A.Я.列尔涅尔 著

控制论基础

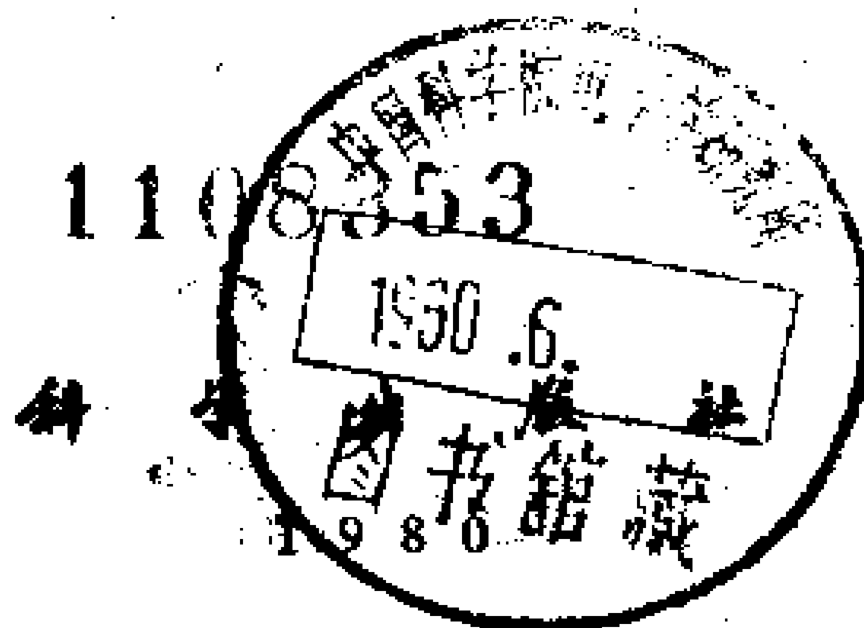
科学出版社

控制论基础

A. Я. 列尔涅尔 著

刘定一 译

高为炳 校



科学出版社

1980

内 容 简 介

本书以深入浅出的语言介绍现代控制论的主要概念和方法。内容包括现代控制论几乎所有的领域：动态系统的自动控制与最优控制、自动机、计算机、对策论、信息论、运筹、排队、巨大系统和生物系统的控制，等等。读者不必具备高深的数学，就能阅读本书。为使读者便于理解本书的内容，每章后面附有问题和解答，书末有进一步阅读的书目。

读者对象为教师、学生、干部、医生和工程技术人员。

A. Ya. Lerner

FUNDAMENTALS OF CYBERNETICS

Chapman and Hall, 1972

控 制 论 基 础

A. Я. 列尔涅尔 著

刘定一 译

高为炳 校

*

科 学 出 版 社 出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行　各地新华书店经售

*

1980 年 4 月第 一 版　　开本：787×1092 1/32

1980 年 4 月第一次印刷　　印张：10 5/8

印数：0001—15,580　　字数：240,000

统一书号：13031·1205

本社书号：1680·13—1

定价： 1.10 元

英译本校者前言

A. Я. 列尔涅尔（Лернер）教授的俄文原本是出色的，在校阅译本时我力求确保英译文明白晓畅。在翻译中，译者考虑周详，使用了目前实用的日常英语，目的是在保持每个技术细节的同时，也保持作者意思的完整性。

这本书名叫《控制论基础》，它是名副其实的。顺便补充一句，虽然本书成功地包括了控制论的绝大部分题材，但它不能不是从一个特殊观点出发的。本书所取的观点是工程师和应用数学家的观点。书中极为强调控制理论，虽然它小心地避开了详细的数学分析，但仍包含一定数量的式子，从而详细阐释了文字的叙述。这些式子是有关控制作用的数学描述，一般可以略去而不致损害读者对正文的理解。

本书的一个最有趣的特征是，它涉及了对策论、通信理论、行为系统和生物系统。这一切都贯串了工程控制论的观点。

要见识当代俄国的控制论学派，本书提供了一个很好的机会。必将证明，本书对一切西方读者来说都是有趣而有价值的。

F. H. 乔治（George）

英 文 版 序

能够造出一台比人更聪明的机器吗?

我们是生活在"机器人时代"的黎明吗?

对于正在为自己的生存而斗争的人们来说，机器是一种威胁吗?

对于活动领域远离控制论的很多人来说，诸如此类的问题使他们困惑不解. 这些问题被热烈地讨论着，关于它们，已经写出了许多通俗的和半通俗的书籍和文章.

另一方面，那些常常议论的、尽管不那么轰动的问题，例如把计算技术和数据处理系统用于生产控制，用于商业、银行业和医疗诊断等等，似乎就不那么引起人们的兴趣了.

控制论的发生与发展，涉及当代的和长期的许多重要问题，为了能从学术上探讨这些问题，只需知道构成这门惊人的学科的基础的那些概念和方法的具体内容. 本书作者想完成的任务就是使读者获得这方面的知识.

作者很高兴英语国家的读者现在将能熟悉本书的内容. 如果在发展科学和将科学成果用于进步利益方面，本书能作出微小贡献的话，作者将认为，他的工作已对献身此道的其他同事助了一臂之力.

A. Я. 列尔涅尔

俄 文 版 序

长期以来就明显地需要一本书，它应当以足够严密的科学论述来介绍控制论的基本概念，而且这本书的形式还要能为一般没有高深数学专业知识的人所接受. 但是，大多数人都承认这样一本书是难写的.

从建立控制论的模型到为信息编码，存在着各方面的问题，一个题目怎么能包含这么多的问题呢？ 不用微分方程或别的数学方法，该怎样介绍这门理论呢？ 此外，在不同的经济、生物和工程的系统的“行为”特征之间，有着内在的相似性，能不能选出例子来，足够清楚地把这种相似性揭示出来呢？ 外表上这些系统毫无共同之处，但是必须阐明它们彼此是相似的，事实上也正是这样.

为了说明上述意图是正确的，我们认为，向广泛的读者介绍控制论的主要概念和方法是相当重要的.

作者显然力求不忽略控制论的重要的或有趣的部分. 但这不是主要任务. 最重要的考虑是，找出适当的表现方法，以使本书适合于教师、工程师、医生、学生和管理人员. 作者特别希望帮助这样一些人，他们既没有充分的数学知识，也挤不出时间来研究维纳（Wiener）、香农（Shannon）、安德尔诺夫（Андронов）和柯尔莫戈洛夫（Колмогоров）等人的著作，但尽管这样，他们仍希望研究解决控制论问题的方法. 这些问题本来是可以研究得比（例如）读了斯坦尼斯拉夫·列姆（Stanisaus Lem）的那本杰出著作所能做到的更深一些的.

作者还有一个隐含的目的，他想给那些把控制论看作是

一种新魔术或仙丹妙药的热心家们泼点冷水。另一方面，他也想克服怀疑论者的悲观主义，这些人不期望控制论会给出什么有用的结果。对控制论的发展所抱的极端看法，通常是由于对这门学科的真实内容的无知。

当然，本书的内容和表现题材的方法，可能成为尖锐批评的话题，也可能给作者的友人和同事们许多愉快的时间，他们将在本书中找到足够的讨论话题。

多亏写作时得到许多人的合作，本书才能相当快地完成。有些人帮我收集例子和问题（Л. 米库里奇，Л. 德朗福特，В. 埃普什坦，В. 布尔科夫等），有些人阅读了本文并提出了批评（Я. 库尔钦，А. 布特科夫斯基，Б. 比留科夫，Б. 郭干），还有些人则帮我成文（Е. 梅才诺夫和 И. 多隆金）。校阅者 А. 戈伯林斯基和编者 Л. 列维金也在手稿上下了很大功夫。Л. 列维金和 Ю. 施摩克莱尔不仅大大地改进了材料的叙述，还弥补了内容上的不足，特别是在第十八章和第十九章。对于所有这些朋友们，作者表示深切的感谢，而对于本书的所有不适当之处和显然出现的错误则承担完全责任，尽管他从这么多方面得到了这一切帮助。

А. Я. 列尔涅尔

目　　录

第一章　导　论

科学的发展，不仅包括从深度和广度上发展已经建立的那些学科，而且还有赖于新科学的出现．新科学的出现和发展，主要受到两种因素的影响：分离和普遍化．

科学的分离是由于发现了新的研究对象以及出现了特别的科学趋势．这引导人们去研究比较狭窄的一类对象，它们的特征是用专门的手段提出问题和解决问题．高分子化学和电机理论就是这种专门学科的例子，它们都是研究比较狭窄的领域的．此外还存在比较普遍的学科，其特征是，它们都是为了研究在很广泛的一类对象中出现的自然现象而创立的．这种学科的例子有：因次理论和相似理论、动力学系统理论和热力学．

与非常特殊的科学正相反，非常普遍的科学因其本性而倾向于更理论化，并且更加依赖于描写它们所用的语言，数学语言或别种语言．

控制论就属于这一类普遍化的学科．控制论的奠基人诺伯特·维纳把控制论定义为：在机构、有机体和社会中的控制和通讯的科学．目前，控制论表示一种能应用于任何系统中的一般控制理论．在这里，所谓“系统”是指当作一个互相关连的整体的一组任意种类的元素．

严格说来，世界上我们周围一切相结合的事物构成一些互相联系的整体，它们都应当被看作是系统．但是，为了解决许多理论的和实际的问题，把系统看作是由较小的一组组元素所构成的是有益的．所以我们把一棵生长中的树或商业，

看作是同整座城市或一个国家相对立的东西。在系统内互相联系的元素越多，这组元素对外部世界的分离就越大，这样一来就越有理由把它当作是一个"分离的系统"。

在用任何类型的控制论方法研究系统中的控制过程时，人们的目的是认识控制过程特征的客观关系，然后用这些关系来改进自然的和建立人工的控制系统，以达到生物的和社会的目的。说到控制，必须认为，任何控制都是从对控制作用进行选择的信息中得出的，即使控制作用本身也是根据控制指令中所包含的信息而得到的。

任何信息都来自伴有主动实验的观察。所以，控制总是和以下各方面联系在一起的：运用观察，运用关于被控系统和与它相互作用着的外部介质的信息，以及运用关于控制作用结果的信息。系统与介质间的信息交换以及系统内各部分间的信息交换，借助于各种类型的联结才成为可能，而信息则是通过这些联结而循环的。这种联结的存在成为任何控制论系统的特征。

反馈在控制论系统中是特别重要的。所谓反馈是这样一个通道，有关控制结果的数据沿着这个通道送回系统中去。正是由于反馈，控制论系统在原则上才能越出设计者预定的作用的界限。最为重要的是，这种特性强调了控制论系统的巨大潜力。

1.1. 控制论的起源

控制论这门科学是在第二次世界大战后才开始发展的。但是，它发展得这样快，以致已经在科学、工程的各种各样的分支中，例如在生物学和医学中，在通讯和自动化中，在计算和经济学中，对于实际问题的研究方法和解决方法发挥了巨大的影响。控制论是以下列观念为基础的：有可能发展一种

一般方法来研究各式各样系统中的控制过程. 除了一般的方法论的考虑外，这个观念的重要性是，它提供了一个有力的工具来定量地描写解决复杂问题的过程. 这个工具又以信息论、动力学系统理论、算法论和概率论的方法为基础.

控制论的诞生一般是和诺伯特·维纳的出色著作《控制论，或关于在动物和机器中控制和通讯的科学》的出版(1948)联系在一起的. 在这本著作中，这位杰出的美国数学家清楚地概述了发展一门一般的控制理论的方法，并为从一个统一观点来考察各种系统的控制与通讯问题的方法奠定了基础.

这些问题之所以引起维纳、罗森勃吕特 (Rosenblueth)、以及对控制论的诞生和发展作出贡献的其他科学家的注意，不仅是因为他们想了解科学的发展趋势和方法，也不仅是因为他们有志于概括各门科学分支的成就 (这一点也起着某种作用)，主要是由于从最为一般的观点出发研究控制问题的紧张工作的直接推动的结果. 这一切也意味着，对各种具体的实际问题提供解答，例如解答在计算机生产和使用中出现的问题，特别是解答使用计算装置来指挥高炮射击、把有用的信号从伴随的噪声中分离出来、设计朗读机器以及神经生理学的某些问题等.

无损于维纳和他的同事们的工作，必须指出，构成控制论基本概念的若干科学趋势，在多年以前就已经发展起来了，有些甚至可以上溯到几世纪以前. 早在一百年之前 [从麦克斯韦 (Maxwell) 和维什涅格拉特斯基 (Вышнеградский) 的工作开始]，控制和反馈系统的理论就已经发展起来了. 自从用逻辑代数研究开关电路方面的著作出版以来，已经过去了三十多年 [苏联的谢斯塔科夫 (Шестаков) 和加甫里洛夫 (Гаврилов) 的著作，以及日本的中岛的著作]. 在十七世纪，巴斯卡 (Pascal) 和莱布尼茨 (Leibniz) 曾有过设计数字计算机

的主意，在十九世纪，C. 巴贝奇（Babbage）又以更成熟灵巧的形式打过这种主意. 但是，只有维纳的工作才在形成一门一般的控制理论方面产生某种"连锁反应".

信息论、开关电路理论、自动控制理论和神经网络理论发展得很快，而且互相渗透、互相促进. 新的工程手段是以模拟计算机和数字计算机的形式出现的；这样一来就使实现控制论实验的工作成为可能，这种实验的基础在于以计算机来模拟控制过程.

尽管许多古典学科专家们怀疑地看待这门新科学，控制论却继续取得进展，同时也证明着它本身的存在权利，这不仅是由于它的理论结果，也由于它对解决许多复杂的实际问题所作出的巨大贡献. 大型数字计算机的发展、最优控制系统和自适应控制系统的发展、运筹控制的有效方法，以及许多其他重要的科学结论和实际结果，都直接归因于控制论领域中的工作所取得的进展: 所以这门科学已表明了本身的正确性.

1.2. 控制论的目的和任务

由控制论引进我们的世界观的一个基本观念是，控制论带来了我们对周围世界的成分的新看法. 世界由物质和能量组成的古典概念已经让位给世界由能量、物质和信息这三种成分组成的新概念. 因为如果没有信息的话，有组织的系统就不能想象，而在自然界中可以观察到的活机体和人造控制系统却都表现出是有组织的系统. 此外，这些系统不仅是有组织的，而且它们随着时间的推移仍保持这一状态，同时不象按照热力学第二定律所预期的那样，损失它们的组织性质.

对有组织的状态得以保持的事实，唯一可能的机械论解

释是，信息是不断地从外部世界取得的。这里信息被认为是属于在外部世界中发生的现象和在系统内部发生的过程的。

控制论的一个基本特征是，它不仅是在静态中考察控制系统，而且也在运动和发展中进行考察。在变化过程中考察系统这一点，从根本上改变了研究系统的方法。在某些场合，用这样的动力学方法还可以揭示出某些关系和事实，不然的话，这些关系和事实将仍然发现不了。如果不考察系统内部组织的动力学的话，那么象稳定性这样的系统功能的性质就不可能被揭示出来，而稳定性对于评价许多系统的工作能力来说，对于阐明系统是否存在一段长时间的可能性来说，都是再重要不过的。

控制论所考察的不是孤立系统，而是一组一组的系统，它们一般说来构成整个宇宙。这门科学应当、而且的确也在考察复杂系统各部分间必然出现的大批相互联系，并试图确定它们的性质、它们的行为、它们的发展和破坏，也研究它们的再生。

控制论方法的显著特征是观点的相对性质，就是说，同一组元素有时被当作一个系统，有时又被当作不过是系统的一个部分，或子系统。例如可以把一台气钻本身看作一个动力学系统，但是我们也可以把人用这台气钻进行工作看作一个系统。人和气钻的这个组合又是这个人的工作单位所组成的系统的一部分，等等。如果不考察各个对象和包围它们的介质之间可能形成的大批联系和相互作用，那么任何对象的性质和特征，都无法具体地评价和考虑。考察介质的影响，是用控制论方法研究出现在被控系统中的现象的特征。

不管对系统的行为的研究多么详细和精确，我们绝对考察不了直接间接影响系统行为的所有因素。所以必须考虑到不可避免地会存在一些随机因素，它们来自尚未加以考虑的

因果过程. 控制论广泛地使用统计方法来研究受到随机激励的系统的行为. 统计方法使我们能严格而精确地预测复杂系统的“平均行为”,虽然这种预测只是从概率角度进行的.

在控制论中发展起来的观念和方法是针对下列目标的:

(a) 确立对一切种类或某些种类的控制系统普遍成立的重要事实. 象在任何理论中一样,事实的资料是不可缺少的,它是提出假设、形成理论和建立法则的基础.

(b) 揭示出被控系统受到限制的特征, 并确定这些限制的起因,即这样也就确定出一些边界,在它们的范围内,设计者可以自由选择控制设备,使这些设备能够改变控制作用,而被控系统在这范围内也可以改变自已的状态.

(c) 找出系统所遵守的一般规律. 根据事实资料, 通过提出相应的公理, 依据所采用的公理对概念进行验证, 控制论,就象别的精密科学一样,能够而且应当逐步建立一批有效的理论概念、定律和原理,从而形成这门科学的核心.

(d) 指出把构成这门理论的事实和关系用于人类实际活动的方法. 控制论的这一实用方面的重要性显然不亚于它的理论发展. 如果不能用于实际目的,那么研究系统的行为、确立事实和关系,显然将毫无意义. 但是,理论本身是不会对许多应用问题提供直接解答的. 为了解决实际问题,就必须在理论概念和用来解决这些问题的实用方法之间架一座桥. 为此就必须考察某些种类的控制系统的特殊性质. 所以,研究怎样把控制论的一般方法用于解决实际问题的是工程控制论、经济控制论、生物控制论这样一些应用科学, 它们又是起源于控制论的.

1.3. 控制论系统

控制论, 作为控制的科学, 它并不一般地研究一切系统,

而只研究控制系统. 但是，控制论适用的范围却扩展到形形色色的系统：工程系统、生物系统和经济系统，只要其中存在着控制.

控制系统(以及被控系统)的一个特征是，在控制作用的影响下，它能改变自己的运动和进入各种状态. 例如，由于不同的驾驶作用，一辆汽车可以处于各种空间位置，可以沿各个方向和以各种速度运动. 一支部队奉了一道命令所作的调动，不同于当下达另一道命令时这支部队所能作出的那些调动. 冰箱的温度可以下降或上升，这取决于冷却器被接通还是断开.

总是存在着一定数目的运动，而如果我们谈到一个控制系统的话，那么就是说已经选定了一种运动了. 如果没有选择，就不可能有控制.

因为世界上的一切过程都是相互关连、相互影响的，所以如果选定了任何一个被控对象，那么我们都应当考虑环境介质对这个对象的影响，以及这个对象对环境介质的影响. 所以，要研究任何被控系统的行为，就必须同时考察这个系统和介质的联系.

所以每一个控制论系统的特征，都是用这个系统具有的那些性质和反映系统与介质间的相互关系的那些联系来表示的. 一个具体的控制论系统，将由机器、自然资源、居民之类的具体对象所组成. 它与环境介质之间的关系是用一定的物理-化学量来表示的(力、能量或物质流等).

摒弃各别的控制论系统的具体特点，并抽出描述在各种控制作用下的状态变化间那些一般关系，我们就得到了抽象控制论系统这一概念. 它的突出特点是：其各元件不是用对象的名称来描述的，而是表现为元素的抽象分类，这种分类法则是由广泛的一类对象的某些公共性质来确定的. 抽象控制

论系统与介质间的关系，也是以定量特性的形式来确定的，而不管具体耦合的定性性质如何.

从研究具体系统转到研究抽象控制论系统，这同算术中研究具体数目的运算转到代数中研究抽象数目的运算是同样性质的. 为简短起见，我们今后将从“控制论系统”这一术语中省去“控制论”一词.

图 1.1 以图的形式用一部分空间表示一个系统，它的元素都集中在其内部了，也表示了这个系统与周围介质的联系. 线条上表示耦合的箭头指出了作用传递的方向. X 表示该系

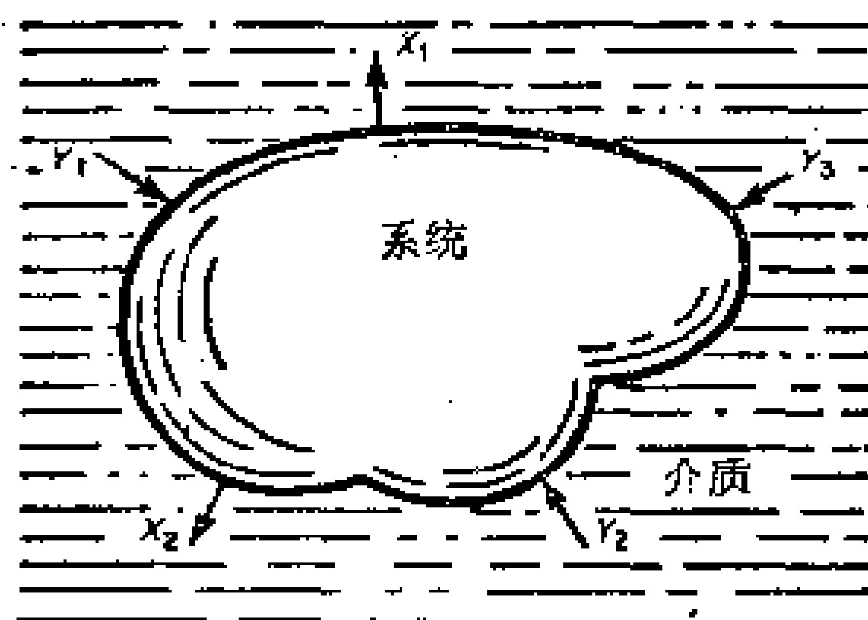


图 1.1. 系统和介质: Y —— 输入, X—— 输出

统对介质的作用，Y 表示介质对系统的作用. 这些联系可以表示集中在系统的某些点处的作用，例如表示为对系统的一个元素施加一个力的形式；如果是对整个系统的表面或每一点上、或是对系统的某些部分施加作用的话，那么 Y 也可以是分布的，例如对系统的某些部分的表面加温或加压，引力场或磁场的作用等，都可以看作分布作用.

作为控制论系统，我们考察控制系统与被控系统，而且它们都应当包含一个实现控制作用的机构. 在某些场合这种作用是由用于其他目的的元件附带完成的，但是这种控制机构常常集中于为控制而专门设计出来的元件上. 在后面这一场

合，被控系统可以用图解表示为两个部分的组合，控制部分(a)与被控部分(b)，如图 1.2 所示．这里箭头指示出系统的两部分间交互作用的途径．

应当指出，这一些非常简单的控制系统或被控系统，事实上决不会孤立存在．它们与环境介质以及彼此之间，都相互作用着，它们可以构成更复杂的控制系统，构成一个控制的一部分，或者构成一个复杂系统的控制部分的一部分，或者构成如图 1.3 所示的被控系统和控制系统中的一个等级．

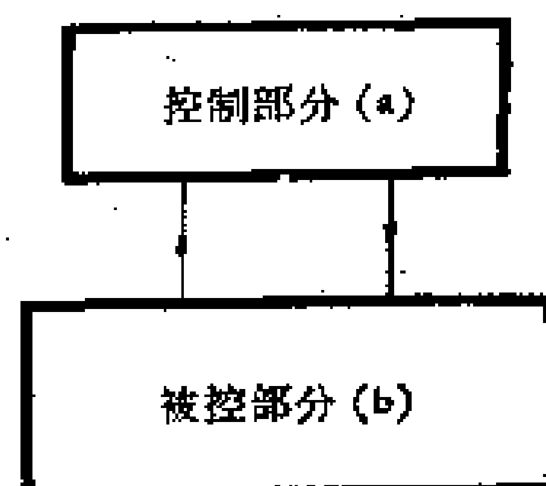


图 1.2．控制论系统的最简结构

“控制论系统”至今并没有达到象数学中的“方程系统(方程组)”或力学中的“物体系统”那样的精密性和确定性．这个概念对一个特殊系统来说是否适用，不仅取决于这个系统本身，还取决于研究这个系统的工作者的观点和目的．所以同一个系统不应当总是被当作控制论中

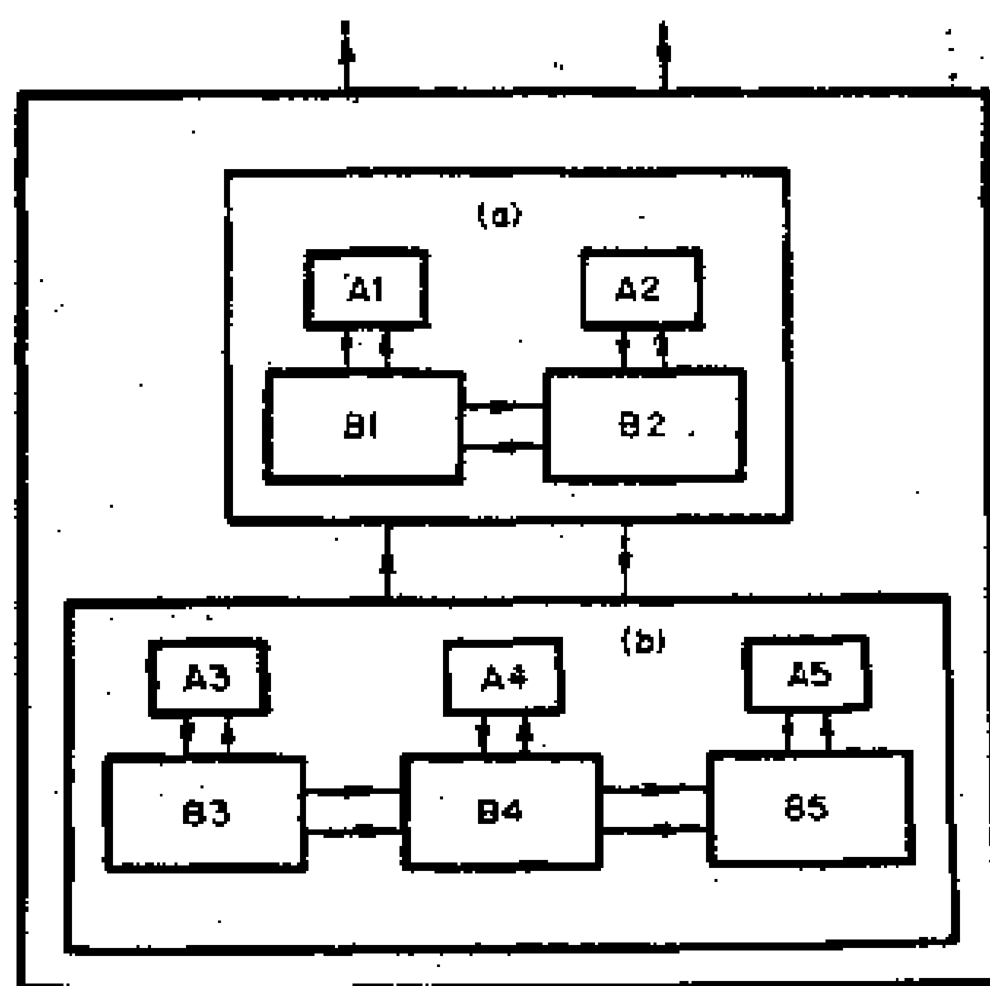


图 1.3．控制论系统的等级结构

的一个单一系统。例如，在设计自动驾驶仪和解决选择最优飞行方案的问题时，可以把一架飞机当作一个被控系统。但是，在解决别的问题时，可以把同一架飞机当作一个物体，它对流过它的空气有一定阻力，或当作一个具有一定刚性的设计对象。

这样一来，"控制论系统"这一术语不仅规定了确定的一类系统，还规定了研究这种系统的途径；一种途径是，在研究该系统的性质和特征时，把它当作被控系统。

显然并非每个系统都是可控的。可控的必要条件是该系统是有组织的，即存在着由它的组合元素以及其间的联结表示的特定结构。"有组织"这一概念很难确切地定义，但从直觉来看，有组织系统显然决不是处于"热力学平衡"之中。例如，可以把由随机运动着的分子组成的气体看作具有零度的组织性，而把能维持本身的存在并复制自己的机体看作具有较高程度的组织性。

显然并非所有的有组织系统都是控制论系统，虽然所有的控制论系统都有一定程度的组织性。

1.4. 说明

本书将涉及各式各样的问题，从作者看来，这些问题构成了控制论的主要内容。由于这些问题的广泛性和多样性，要在一本篇幅有限的书里，介绍这些重要问题的所有值得介绍的材料，显然是不可能的。我们的目的是使本书容易为没有很多数学知识的读者所理解，这就不得不限制了可加说明的问题的数目，这里我们必须不用微分方程、统计动力学等工具来做到这一点。结果有很多有趣的问题就完全不能讨论了，而有些则只能以一种简化的形式加以考虑。但是，我们已力求不仅介绍在控制论的基本工作中发展起来的观念，而且还尽

可能告诉读者有关的知识和方法，它们构成定量地分析控制论系统中各种现象的工具.

在本书中所描写的概念，是按由简人繁的顺序提出的。我们从控制系统与被控系统的运动学的基本概念开始，这里给出了一个关于系统的运动形式和它的描写方法的观念。然后引进控制论的一个基本概念——模型概念，它决定着研究任何类型的控制论系统的途径。

系统运动的动力学是根据运动的几何解释——相空间法——来考虑的。控制论的一个基本概念信息概念的引进，使我们能在通信中以及为了控制的目的，定量地计算信息中所

们建议读者把这些练习和问题都做一遍，这不仅是因为它将有助于更好地理解正文中介绍的知识，而且还由于在回答这些问题时，将认识一些新事实，或者将亲自得到一些附带的结果。

有些读者可能对更深入地研究本书中的各个问题感兴趣。在控制论及其邻近学科的广泛文献中，为各章所附加的推荐书单，可以作为读者的引导，各书中包含了关于那一章所涉及的问题的更详细的知识。

第二章　运　　动

"运动"一词在力学中用于狭义，它表示空间中任何物体随时间推移而发生的位置的变化。在控制论中，"运动"具有更普遍的涵义——在一个对象中随时间推移而发生的任何变化[1]。

例如运动可以是物体的温度变化，电容器的电荷变化，气体的体积或压强的变化，某人的银行存款变化，原材料贮存量的变化，最后，象生命和思维过程也会、而且一定会显示出变化。

因为各种各样对象的运动服从许多普遍有效的定律，特别是从对所涉及的过程进行控制的观点来看，所以下面这种做法可能是有益的：不去考虑真实系统（这种系统有许许多多）的运动定律，而考虑在第 1.3 节中已描写过的抽象控制论系统的运动定律。在本章中所用的描写运动的方法，对于理解后面所有各章的材料来说，都是不可缺少的。

2.1. 系统的状态，状态空间

任何系统的状态，都可以在一定的精确度上，用决定它的行为的一组值来描写。借助于这些值，就能比较各个系统的状态，并判断它们之间的差别。这些值还可以用来比较同一个系统在不同时刻的状态，以便解说系统的变化程度。如果我们愿意的话，我们可以把这种变化当作运动。

---

1) 这在本质上就是辩证法的传统观点。著名的黑格尔公式："运动就是一般的变化"。

描写系统状态的办法很多。例如，可以列出量 X_1，X_2，$\cdots$，X_n 的值的范围，这里量 X_1，X_2，$\cdots$，X_n 决定一个系统在给定时刻的状态，然后列出这些量在不同时刻的值。这时可以把系统的状态序列表示为一张表。例如，一个患急性肾炎的病人的状态，可以用表 2.1 中给出的数据来表征。

表 2.1　一个患急性肾炎的病人的状态序列

日期	时间	体温(℃)	血压(毫米汞柱)		血中的剩余氮含量(毫克%)
			收缩压	舒张压	
2月7日	上午九时	37.8	190	120	103
2月8日	上午九时	37.6	180	120	95
2月9日	上午九时	37.4	170	95	89
2月10日	上午九时	37.0	165	90	90
2月11日	上午九时	37.1	175	100	102
2月12日	上午九时	37.6	180	100	100
2月13日	上午九时	37.5	170	90	91
2月14日	上午九时	37.1	160	90	84
2月15日	上午九时	37.1	150	90	60
2月16日	上午九时	36.7	145	85	49

一个系统的状态也可以用图来描写；把量 X_1，X_2，$\cdots$，X_n 的序列中的每一个 $X_i(i=1,2,\cdots,n)$ 的值，表示为直线上的一个点，它的位置按一定的比例尺对应于量 X_i。如果系统的状态随时间的推移而变化，那么这种运动就可以用一族图 $X_1(t)$，$X_2(t)$，$\cdots$，$X_n(t)$ 来表示，这里 t 是时间，它以任意选定的时刻作为时间的初始参照点。图 2.1 给出了一族图来描写一只船的运动。这里 X_1 是这只船的航程，X_2 是它的速度，X_3 和 X_4 分别是船位的经、纬度。

通常还用另一种方法来表示一个系统的状态和运动，它是以系统的状态空间这一概念为基础的。对于一定的目的，这种方法更为方便。

上面已经用到了把任何变量都当作直线上一个点的描写方法，这种方法表示的空间维数是一，我们通常说，它是个一维空间。如果要用一个点来表示两个量的集合（X_1 和 X_2），那么一维空间就不适用了，这时就必须使用二维空间，让我们取一个平面并画上直角坐标系，如图 2.2 所示。这里点 a 所描写的系统状态，表示为 $X_1=X_{1a}$，$X_2=X_{2a}$，而点 b 对应于 $X_1=X_{1b}$，$X_2=X_{2b}$。

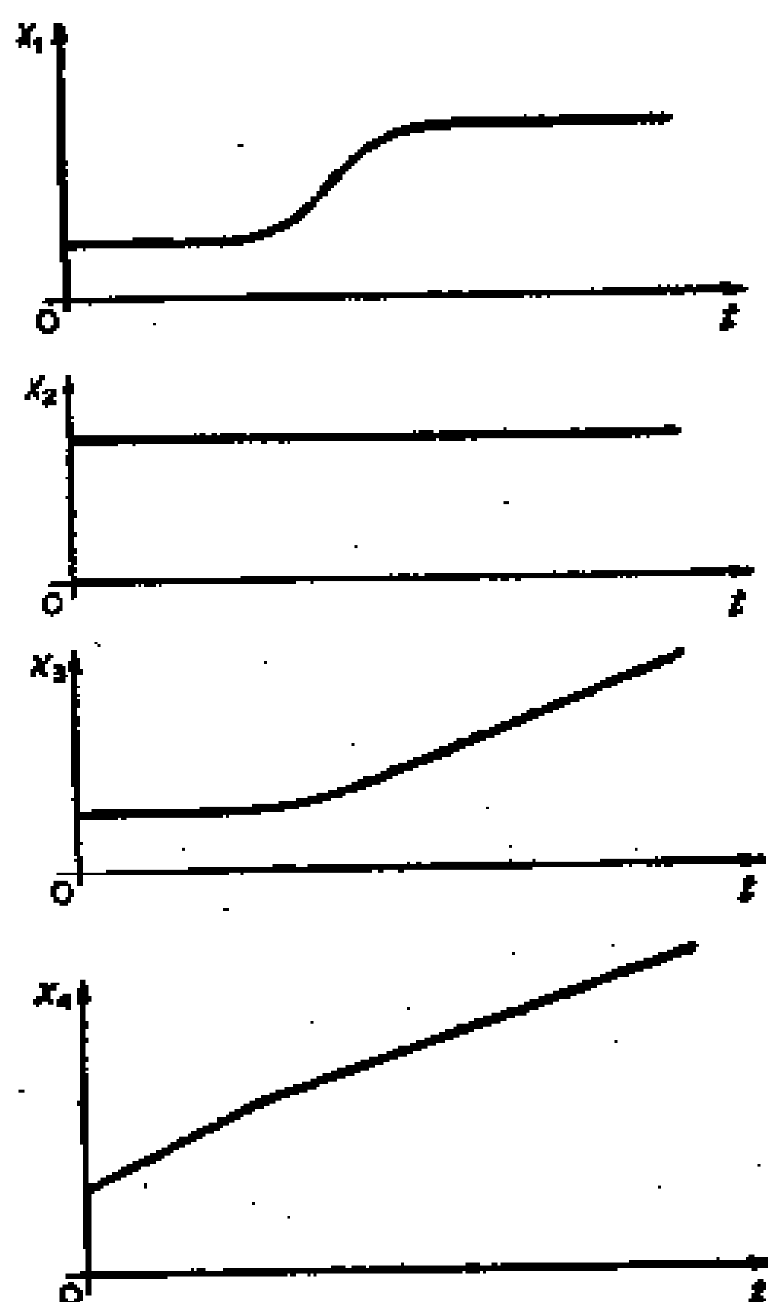


图 2.1. 船的运动的图示

如果系统的状态取决于三个量的值，那么它显然应当用三维空间中的点来描写，如图 2.3. 所示。

决定所考察系统的状态值的个数，我们将用 n 来表示。对于 $n=1$，$n=2$，$n=3$ 来说，系统的状态可以清晰地表示为图的形式，但是当维数大

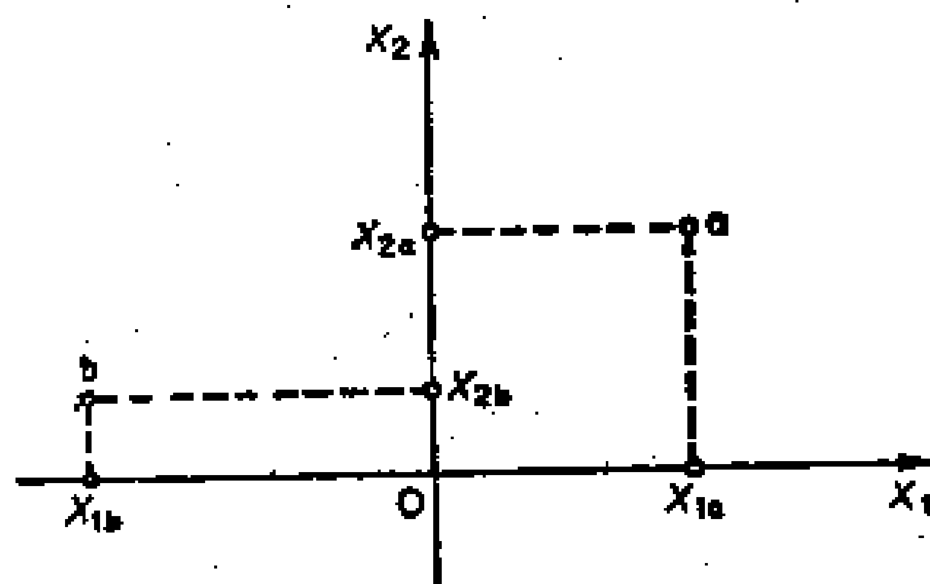


图 2.2. 系统的二维空间状态

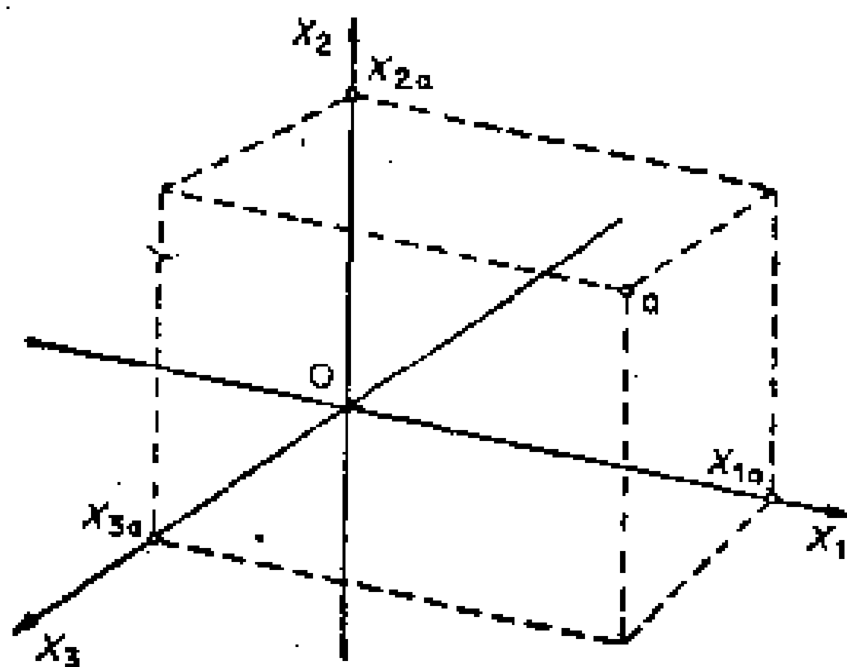


图 2.3. 系统的三维空间状态

于 3 时，就不容易使用图示法了.

尽管如此，当 $n>3$ 时，仍然可以设法把这种系统的状态表示为适当空间中的点，从而引出关于这种系统的性质的重要结论. 显然这需要用到多维空间（也叫做超空间）的概念，这是办得到的. 尽管 n 维空间的概念很抽象，但是在许多方面它的性质却类似于我们在熟悉的一维、二维或三维空间里已习惯的那些性质.

特别是一个基本的几何概念——两点间的距离——可以象三维空间中那样，用到 n 维空间中去. 在三维空间中，点 a 和点 b 间的距离 d，无非是图 2.4 所示的平行六面体的对角线长，这个平行六面体的顶点含有 a 和 b，而各边则平行于坐标轴.

我们从立体几何中知道，各边长为

$$x_1=X_{1b}-X_{1a},\quad x_2=X_{2b}-X_{2a},\quad x_3=X_{3b}-X_{3a}$$

的长方体的对角线长 d，可以由下列公式确定:

$$d=\sqrt{x_1^2+x_2^2+x_3^2}. \tag{2.1}$$

同样，对一个 n 维空间说来，坐标是 $(X_{1a}, X_{2a}, \cdots, X_{na})$ 的点 a 与坐标是 $(X_{1b}, X_{2b}, \cdots, X_{nb})$ 的点 b 间的距离，可以

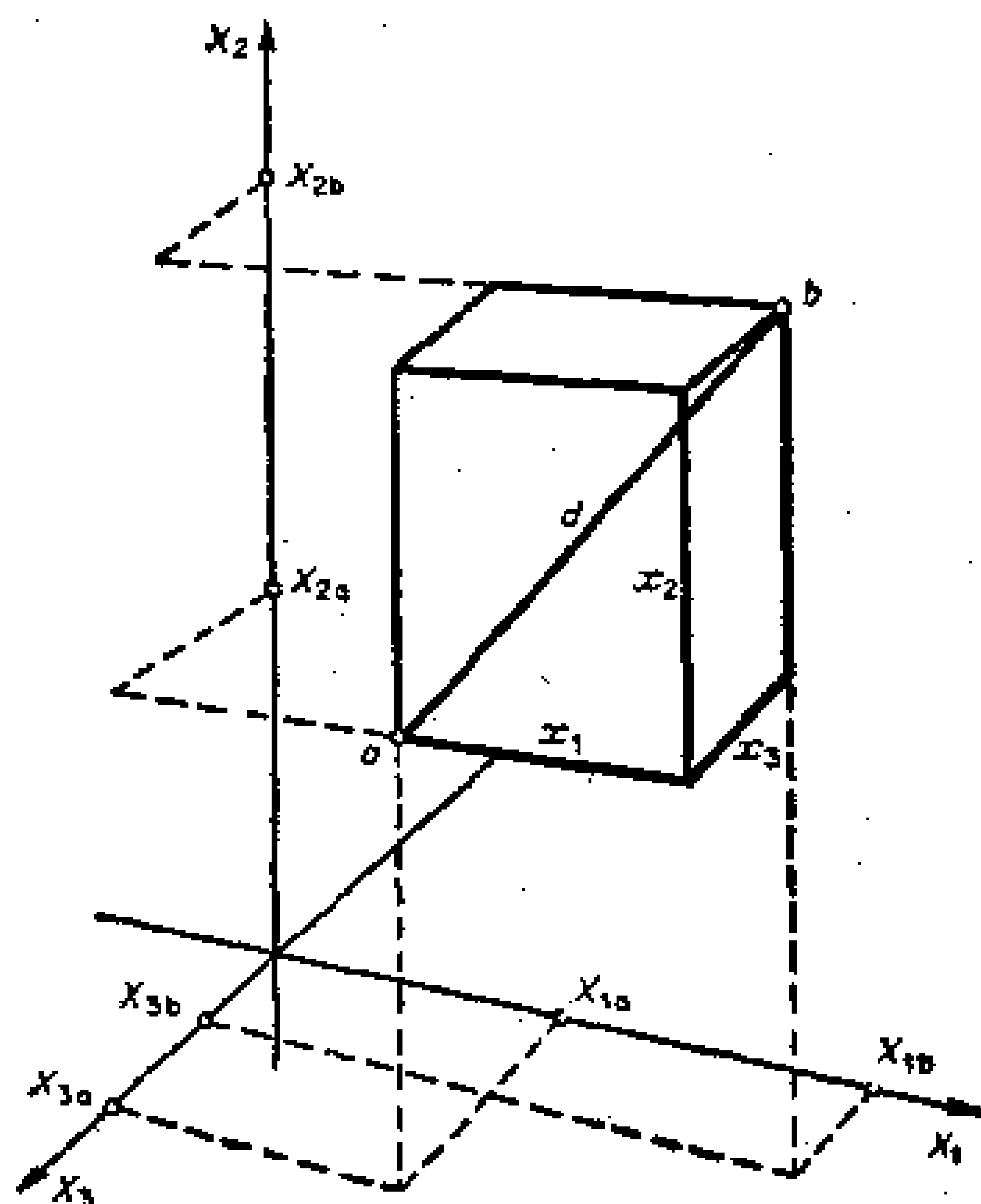


图 2.4. 欧几里得空间中两点间的距离

确定为值

$$d=\sqrt{x_1^2+x_2^2+\cdots+x_n^2}, \tag{2.2}$$

这里 $x_1=X_{1b}-X_{1a}$, $x_2=X_{2b}-X_{2a}$, $\cdots$, $x_n=X_{nb}-x_{na}$. 值 x_1, $\cdots$, x_n 等于一个 n 维长方体的边长。这类似于图 2.4 所示的三维长方体。

距离由 2.2 式确定的空间叫做欧几里得空间。在这种空间里，古典欧几里得几何学的一切定理，特别是勾股定理，都是正确的。

如果在一个空间里，系统的每个状态都表示为一个点，那么这个空间就叫做**系统的状态空间**。状态空间的维数等于确定系统状态的独立变量的数目。这些独立变量的数目通常叫做系统的**自由度**。系统的每个状态是由变量 X_1, X_2, $\cdots$, X_n

的确定值的一个集合来描写的. 在状态空间中，这对应于具有同样的坐标值 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 的一个点. 这个点叫做代表点(它"代表"系统的给定状态)，而变量 $X_1, X_2, \cdots, X_n$ 叫做系统的坐标.

在真实系统中，并非所有坐标都可以无限制地变化的(例如 $-\infty < X_i < \infty$). 大多数坐标只能在一个有限的区间里取值，即在满足条件

$$X_i' \leqslant X_i \leqslant X_i''$$

的区间里取值，这里 X_i' 和 X_i'' 是坐标 X_i 的可能值区间的边界. 状态空间中代表点可能存在的范围叫做容许状态范围. 在下文中，当说到状态空间时，我们都将只考虑这一容许范围.

即使在容许状态范围里，一个任意点也并不总是表示系统的可能状态. 只有与坐标可取任何值(在容许范围内)的系统相对应的连续状态空间才具有这种性质. 但是还存在着离散系统，在这种系统中坐标只能取有限个固定值. 这种系统的状态空间是离散的. 这时代表点只能占据有限个位置，位置数

$$S = s_1 \cdot s_2 \cdot \cdots \cdot s_n,$$

这里 s_i 是第 i 个坐标的离散状态数.

如果系统在变化，那么坐标也随时间变化. 在这个过程中，代表点在状态空间中改变着它的位置，结果描绘出某条轨迹.

作为例子，我们来考察在一个活塞压缩汽缸中的过程，如图 2.5 所示. 这个系统的状态可以用两个值来描述: 活塞离汽缸后壁的距离 l 和汽缸中的气压 p. 所以状态空间是二维的，代表点的坐标是 $X_1 = l$ 和 $X_2 = p$. 工作循环是以活塞 3 向右运动开始的. 残留在"死空间" l_d 里的、压强为 p_d (点 d) 的空气，膨胀到吸入压 p_0 (点 a). 于是新鲜空气通过入口阀

1 进入汽缸．在图中这一过程表示为线 $a—b$。

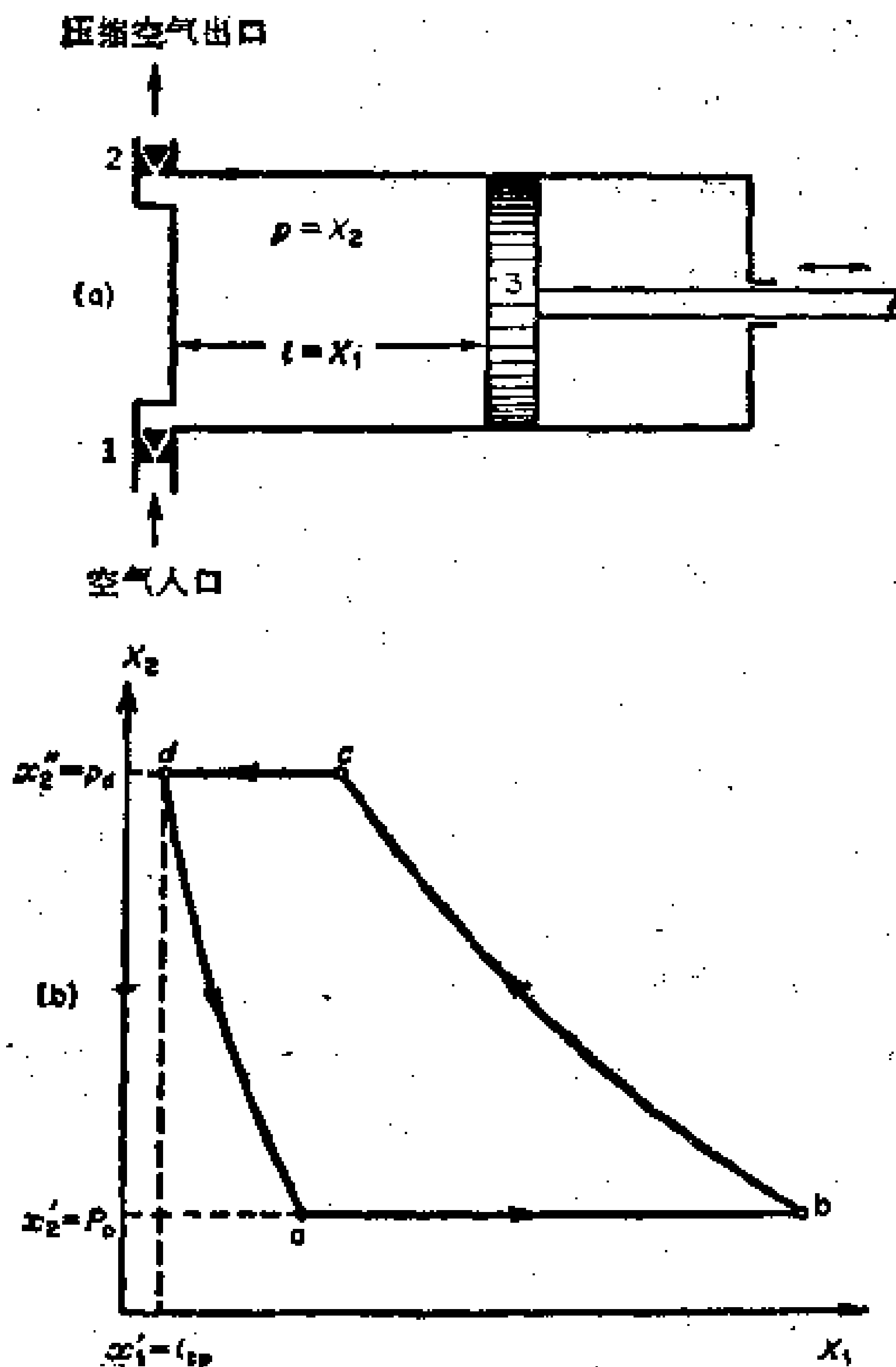


图 2.5. 描写状态空间中的变化的例子：
(a) 活塞压缩机略图；(b) 工作循环

当活塞向左运动时，空气被压缩到压强 p_d（点 c），为活塞所追而通过出口阀 2（线 $c—d$）直到压缩冲程结束，然后排出．通常活塞并不是一直行到汽缸的后壁，而是留剩一段距离 l_d，尚有一定体积的压缩空气残留在汽缸里，这就是死容

积。

就此终止了工作循环，然后所有这些过程又依次重复一遍。代表点在 X_1, X_2 平面上沿箭头所指方向描绘出一条封闭轨迹。在本例中，代表点总是返回同一个位置，这意味着在这个系统中同一些状态作多次的重复。

2.2. 输入值与输出值

一个系统的运动——它的状态变化——既可以在外部因素的影响下出现，也可以作为系统本身中发生的过程的结果而出现。

严格说来，每个系统都受到无穷多个外力的影响，但并非所有这些外力都是同等重要的。月球引力对于汽车相对地球的运动来说，显然没有什么大的影响，虽然原则上这种影响是存在的。对于一个具体问题说来，只有那些对于系统的状态有重大影响的外部作用才必须加以考虑。这些外力叫做该系统的输入值或输入信号(有时也叫做输入变量)，而系统的那些有输入信号作用在其上的元素，叫做系统的**输入**。

例如，一架飞机的运动大大地受到下面这些因素的影响：风力和风向，大气密度，方向舵、升降舵和副翼的位置、发动机的推力。所有这些因素都是飞机的输入变量。

采取下列作法常常是适当的，我们不把确定系统状态的坐标 X 当作系统的输出量，而是把由这个系统的坐标唯一确定的其他一些量 Z，当作系统的输出量。l 个输出值 Z_i 的每一个，都通过函数关系式

$$Z_i = \phi_i(X) \quad (i = 1, 2, \cdots, l) \tag{2.3}$$

和系统的坐标相联系。

这时，可以把被控系统表示为 S 和 ϕ 两部分的形式：S 是把输入作用 Y 变换为坐标 X 的部分，ϕ 是把坐标集合变换为

输出值的函数变换器的集合，见图 2.6.

如果我们所研究的控制问题并不是把系统引进一个给定状态，而是为了达到一定目的，而这个目的和被控系统的状态有某种函数关系，那就需要在研究中引进输出值，这些输出值并不直接列入确定系统状态的坐标集合.

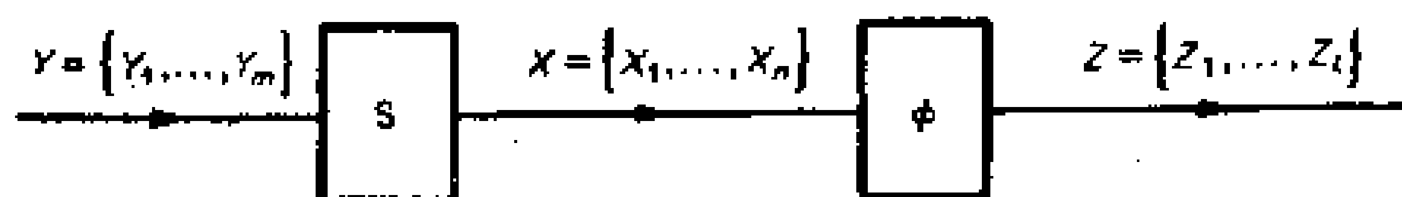


图 2.6. 表示输入值到输出值的变换的略图：Y——输入值，X——被控系统的坐标，Z——输出值，S——输入值-坐标系变换器，ϕ——坐标-输出值变换器

例如，控制合成纤维生产的目的，是为了得到规定强度 Z_1 和规定弹性 Z_2 的纤维. 这两个量依赖于下列过程的坐标：物质的温度（X_1），基本原料中的混合物含量（X_2，X_3，$\cdots$）等等. 显然在这种情况下，必须把这些输入量同表征系统状态的那两个坐标区别开来.

在解决控制问题时，区别下列两种输入信号是重要的：一种是控制的一部分，另一种是干扰. 控制信号所包括的量，它们在对系统进行控制时是可以加以调节的，并可以改变，以实现比系统的其他可能运动更可取的运动. 在前面谈到过的飞机的例子中，控制作用就是由驾驶员按他的意愿而进行操纵的方向舵、升降舵、副翼和发动机推力所产生的那些作用.

干扰包括对系统的其他重要影响，例如风和大气密度对飞机运动的影响. 当有必要区分输入的类型时，控制作用就用符号 Y_1，Y_2，$\cdots$，Y_r 来表示，干扰则用符号 M_1，M_2，$\cdots$，M_s 来表示.

系统对周围介质的作用是通过它的输出信号来表征的. 输出的集合及其变化，确定着系统的行为；正是这些使外部观

察者能评定系统的运动是不是符合控制的目的。

在控制飞机运动的例子中，输出值是飞机的航向和速度，因为这两个值确定负载的方向和速度，而这时控制的目的正是把负载在指定时间内运到指定的地点。加在动物身体上的输入作用，恰恰是动物的感觉器官所感受到的那些作用，输出值则是它的器官的运动。

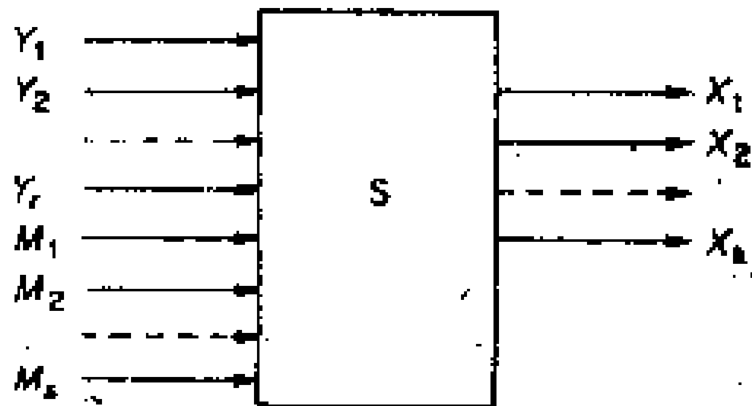


图 2.7. 输入值和输出值

一般来说，输入的变化会引起输出的变化。但是输出并不总是立即变化的，有时它们可能落在后面，但它们决不会赶在输入变化的前头，因为输出是输入的结果，而输入是系统运动的原因。图 2.7 表示了一个系统 S 及其输入值和输出值。

应当指出，影响一个系统的运动的干扰，可能不仅来自外部，也可以来自系统内部，例如可能是由于系统的元件经过长时间操作后性质发生变化的结果，或一般地作为系统的元件的正常功能受到干扰的结果。

有时为了方便起见，可以把控制论系统看作是拆开成相

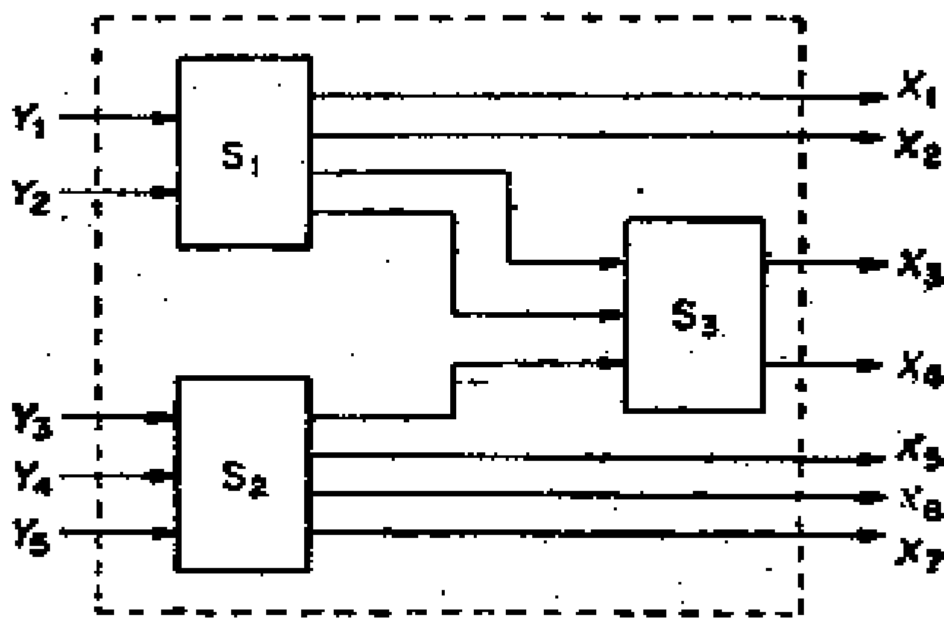


图 2.8. 一个控制论系统的若干相互作用的部分

互作用的若干个部分．这时系统的一部分的输出可以同时是另一部分的输入，例如如图 2.8 所示．

2.3. 变换

一个系统的运动可以视为它的状态的一系列变换．可以假设，系统从 t_1 时刻的状态 a_1 到 t_2 时刻的状态 a_2 的转移，是把 a_1，t_1 变换为 a_2，t_2 的结果．任何系统或元素在输入变化的作用下所产生的输出变化，也可以看作是输入到输出的变换．

我们说，一个对象到另一个对象的变换，是由算子对该对象的作用而实现的．变换所作用的对象叫做运算对象，而变换的结果叫做变换象(算子把一个对象"映射"到另一个对象上)．

使用所介绍的这些术语，我们就可以描写任何变换如下：作用于运算对象上的算子，把运算对象变为变换象．显然，在算子的接连作用下，必须把前次运算中得到的变换象看作运算对象．系统相继转移到状态 a_0，a_1，a_2，··· 的过程，可以作为算子 P 按下列模式的作用结果而出现：

步骤	运算对象	变换	变换象
1	a_0	Pa_0	a_1
2	a_1	Pa_1	a_2
3	a_2	Pa_2	a_3
···	···	···	···

如果把算子 P 的 n 次作用记为 P^n，那么我们得到

$$a_n = p^n a_0.$$

如果把系统的输出坐标 X，看作是对输入值 Y 作变换的结果，则 X 与 Y 之间的关系可以写为

$$X = KY$$

的形式，这里 K 是表征该系统的性质的算子．如果该系统含有 n 个输出坐标和 m 个输入坐标，则我们得到

$$\{X_1, X_2, \cdots, X_n\} = \{K\}\{Y_1, Y_2, \cdots, Y_m\},$$

这里K象征性地表示整个变换集，它考虑了每个输入对每个输出的影响。

如果所考察的系统表示一个无惯性的线性变换器（例如电子放大器、机械变换器或光电管），那么算子K将起一个变换系数(传递因子)的作用，并将代表一个数k，输入必须乘以这个数k才得到变换器的输出。

$$X = kY.$$

对于一个非线性的无惯性转换器来说，输出值是输入值的某个函数，而算子将记为符号F，同时给出一个非线性变换

$$X = F(Y).$$

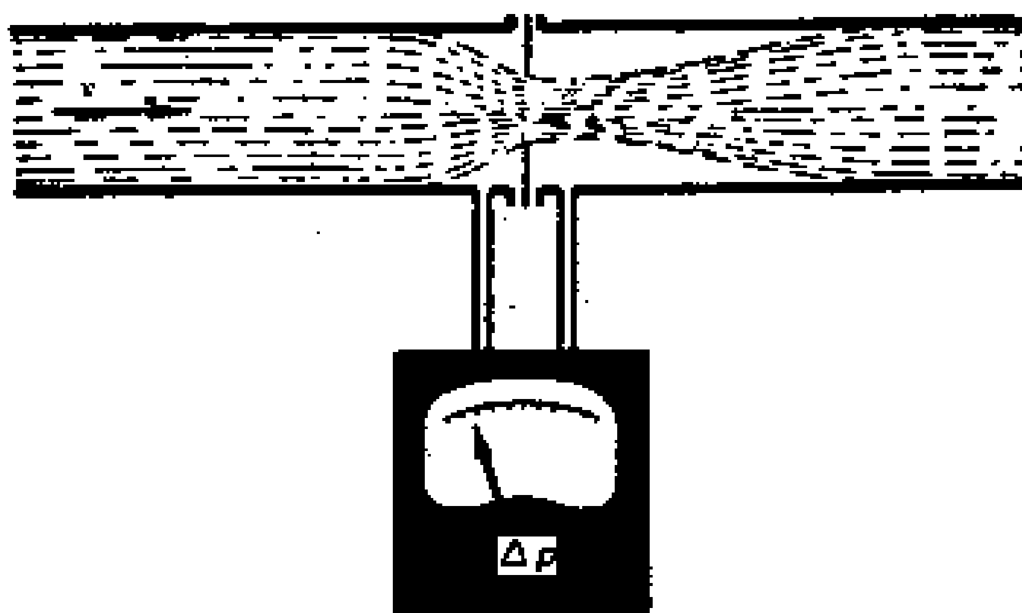


图 2.9. 测量液体流速的装置

作为例子，我们来考察一个测量液体流速的装置（图2.9），这里输入值Y是液体的流速v，输出值X是水力阻滞两端的压力差Δp，这时在输入值与输出值之间的关系将是

$$X = cY^2,$$

这里c是常量。因此这时变换算子就是平方后乘以该常量。

如果在相应于输入值的那些值处，不能瞬时地确定输出坐标，那么算子就更复杂了，而且不能只用代数运算来表达这个算子。

练习

1. 拨一个六位数的电话号码. 试确定该系统的状态空间的维数. 这个系统的坐标相当于什么? 当相继地从 1 到 0 (1, 2, …, 9, 0) 改变电话号码的最后一个数字时, 代表点的表现如何?

解: 状态空间将有维数 $n=6$. 该系统的坐标相当于电话号码的各数字(假定整个号码都由数字组成). 代表点将沿最后一个坐标移动.

2. 一家工厂专门用已加工好的元件装配汽车. 对这个系统来说, 输入值和输出值是什么? 这时干扰输入是什么?

解: 主要的输入作用是交付给这家工厂的加工好的元件, 和由计划机构发下的汽车生产计划, 输出值是所生产的汽车数量. 当加工好的元件的供应中断时, 或工厂的工作节奏中断时, 就出现干扰.

3. 某一系统有四个不同状态, 且已知代表点所描绘的轨迹是封闭的(图 2.10). 可以有两个算子作用于这个系统: P 使这个系统从一个给定状态顺时针地变到下一个状态, Q 使这个系统反时针地从给定状态变为它前面第二个状态. 设这个系统有 a, b, c, d 四个状态. 已知象 c 是先把算子 P 用于一个运算对象, 然后再用算子 Q^2 而得到的. 试找出这个运算对象. 如果对所找到的运算对象先用算子 Q, 再用算子 P^1, 那么情况怎样?

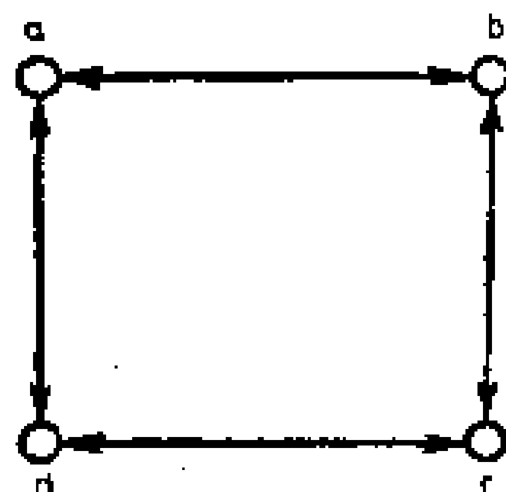


图 2.10. 解释第 3 题的略图

解: 所求运算对象是状态 b. 对 b 相继用算子 Q 和 P^2 就得到象 b.

第三章 模　　型

长期以来，各种对象的性质的相似性，就已经成为研究自然界形形色色现象的科学方法的基础。建立性质相似于所研究的现象的模型，这样的模型概念，实质上已经以或显或隐的形式，被引入到所有的科学分支中去了。但是，建立模型的概念，在任何领域中都没有象在控制论中那样明确和彻底，这里它是以最一般的形式表现出来的。从研究控制论系统的行为的技术的观点看来，这是一个有决定性的基本概念。

围绕着建立和利用模型的一系列问题，是以各种方式提出和解决的。我们可能对这样一个模型感兴趣，它同原型的区别在于几何尺寸的比例度，或在于过程的持续时间不同，从实验研究的观点来看，模型可能具有某些方便的性质。

用一个具有不同物理性质的模型，来研究某一对象的性质常常是方便的，这种研究的基础是描写原型与模型二者的运动方程在形式上、函数关系上的相似性。

简化模型（或抽象模型）的概念在科学上非常重要，这种概念使得我们能研究非常复杂的对象和系统，而在简化模型中，只保留原型的一些性质，从特定角度看，它们对所研究的对象是很重要的。当我们只能研究模型而不能研究实物的时候，就是说研究实物的问题无法进行时，建立模型的过程是重要的。研究模型使得我们只考虑有关的东西。

3.1. 原型和模型

模型概念的基础在于，模型本身与某一对象之间，存在着

某种相似性．这里对“相似性”和“对象”两词应作最广义的理解．相似性可以纯粹是外表的，也可以这样，对象与模型在外表上毫无相似之处，但它们的内部结构却相似，或者对象与模型在形状和结构上毫无共同之处，但它们的行为的某些一般性质却相似．相似性概念适用于非常广泛的一类物质对象，包括自然界的生物和无生命对象、人造对象、图画、符号等．

如果在两个对象之间可以建立某种相似性，那么在这两个对象之间就存在着原型-模型关系．

这意味着，可以把这两个对象之一看作原型，另一个看作模型．对一定目的来说，任何东西都可以是任何原型的模型，只要有一点点相似性就行．

在原型和模型之间的相似性将用记号～表示．因此，如果对象 A 是对象 B 的模型，我们就把这写为 $A \sim B$ 的形式．于是我们也可写 $B \sim A$，而这总是正确的，因为对象之间的相似性是相互的．原型-模型关系可以出现在两个对象之间，也可以出现在任意个对象之间．例如对于一批对象 $A \sim B \sim C \sim D$ 来说，其中任何一个，例如 B，可以看作对象 A，C，D 的模型，也可以看作模型 A，C，D 的原型．

外表相似性——例如形状的相似性——出现在以下所述的对象上，一只船与它的某种表示物：画片、立体模型或蓝图；金属铸件与它的木模．在结构上也可以存在相似性：经济控制系统与它的结构图；城市的供水网和这个城市的供电网．从控制论观点看来，在两个系统之间导致原型-模型关系的最重要的相似性是行为上的相似性，这使我们有可能建立运动或变化的模型．建立行为模型的基础是，在一定条件下，在形式、结构和工作过程的物理性质上完全不同的若干系统中，可以观察到同样的行为．

作为例子，让我们看一个气体高温计（系统 A）和一个热

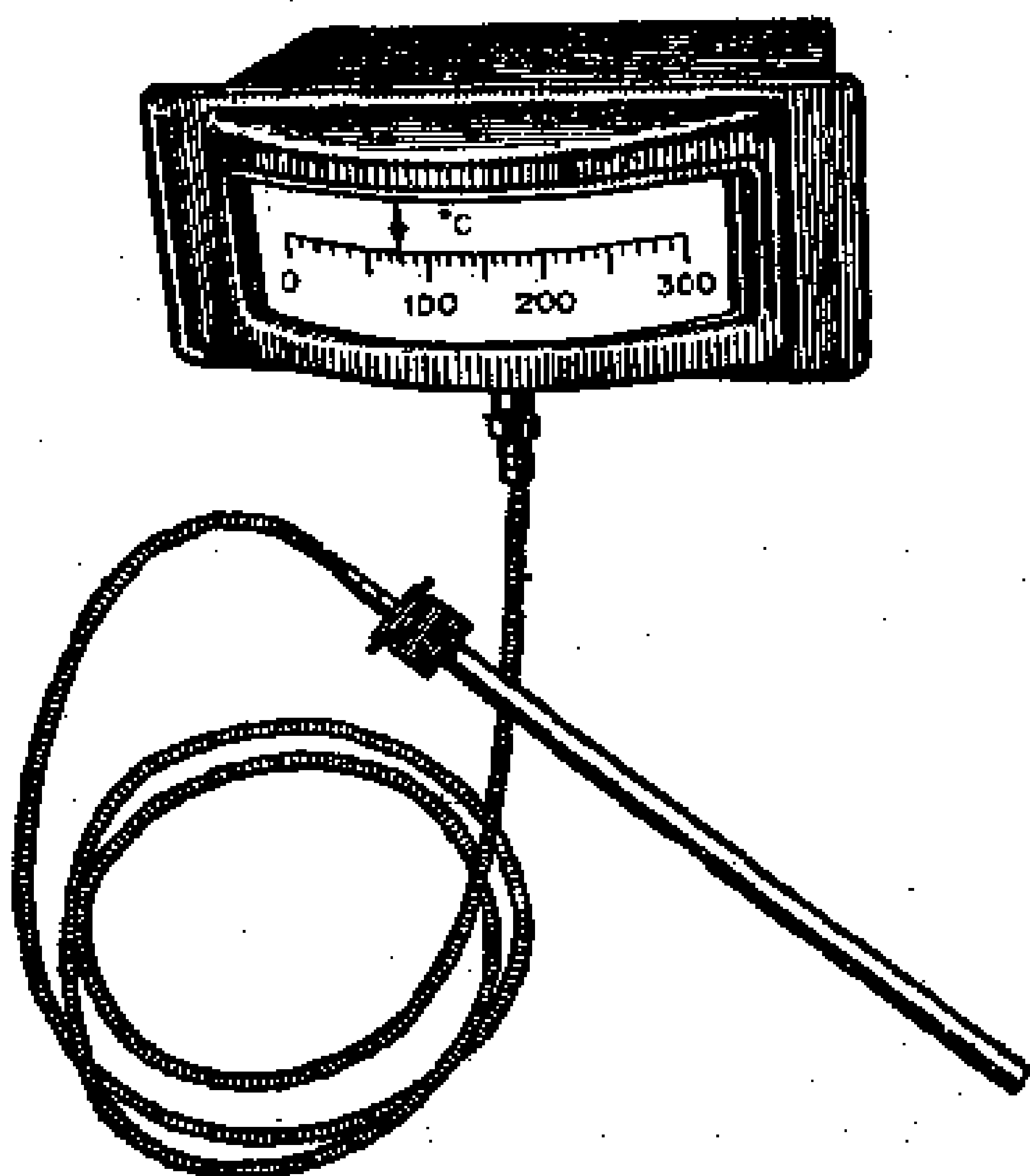


图 3.1. 工业高温计的外观

电高温计(系统 B)。这两个仪器可以设计成外形相似，如图3.1 所示那样。

因为这两个仪器都是用来测温的，所以管壳 1 (图 3.2) 都浸入应测温的介质里。测量仪表的指针通过管 2 和管壳相连，它产生偏转，移到表示标尺刻度的一个位置上，这个位置对应于被测的温度。这两个仪器的外观是一样的，而且所作的反应都等于输入值(围绕管壳的介质温度)的变化。但是从内部看来这两个仪器却大不相同。管壳 A 中充有气体，气体的压力随温度的变化而变化。这一压力是由一个压力计来测量的，压力计通过一根管子与管壳相连，放在如图 3.2(a)所示的管子里。仪器 B 的管壳里的热电偶产生一个电动势，电动势的大小依赖于它的热端的温度。这一电动势是由一个毫伏

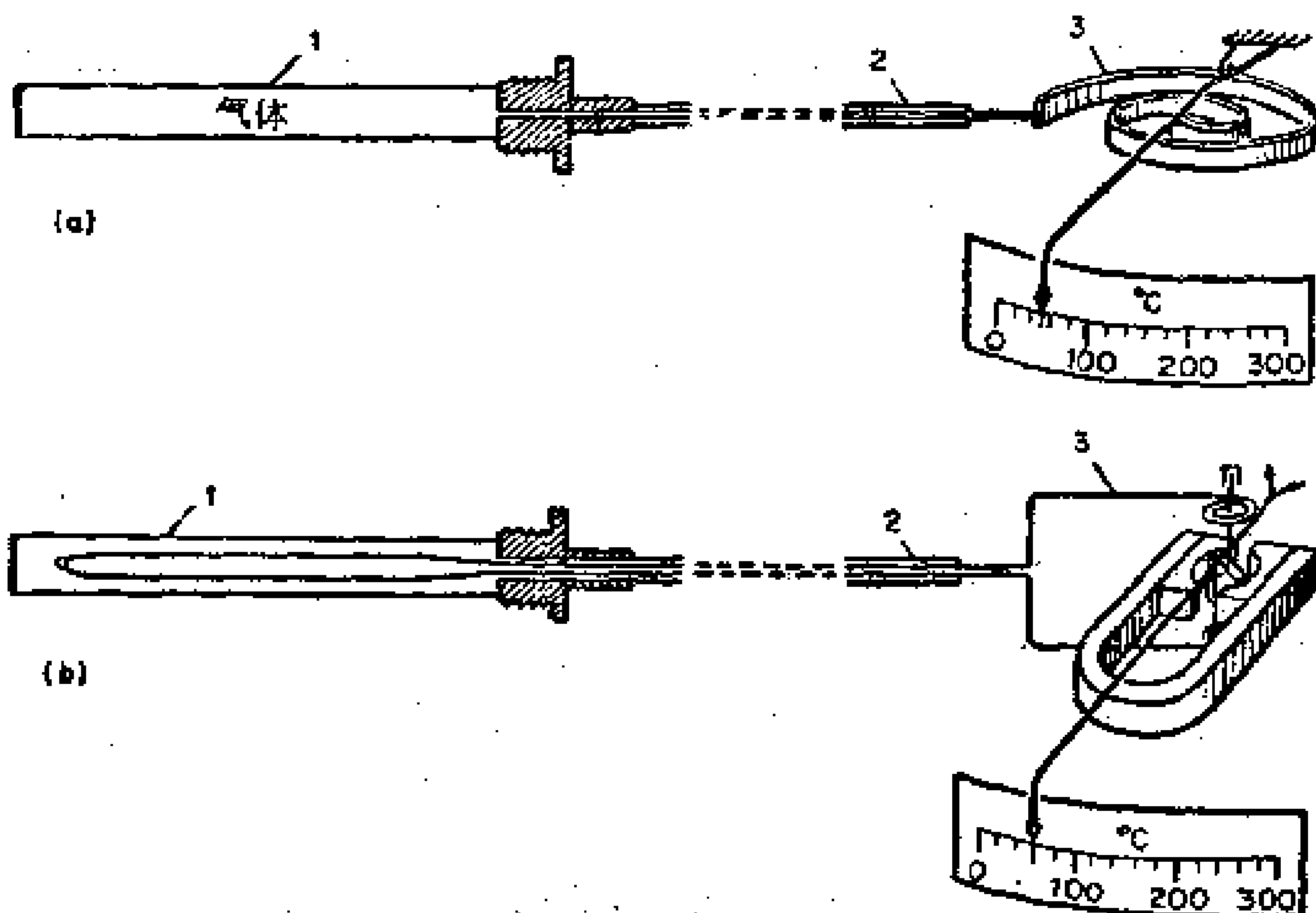


图 3.2. 工业高温计：(a)压力式；(b)热电式

计来测量的，毫伏计用管内的导线和热电偶相连，如图 3.2(b)所示。

如果这两个仪器的元件在设计时是这样选定的，使得对同一个介质温度来说读数相同；又如果它们的惯性性质也使得在同样条件下这两个仪器的指针到达读数的速度也相等，那么从对输入激励起反应的观点看来，仪器 A 和 B 就变成不可分辨的了，至少对于输入值的规定变化范围来说是这样的。于是这两个仪器中的任何一个，都可以看作是另一个的模型，它精确地复现着我们感兴趣的那个原型的性质。

3.2. “黑盒”

为了提出和解决被控系统的模型建立问题，“黑盒”的概念看来是非常有成效的。所谓黑盒是指这样一个系统，我们只能得到它的输入值和输出值，而不知道它的内部结构是什么。

已经发现，只观察输入变化引起的输出反应，也可以推出关于系统行为的许多重要结论．这个途径开辟了客观地研究这种系统的可能性，而系统的结构，或者不知道，或者要从系统的行为推出关于它的结论来说太复杂了．

设一个系统的行为取决于它的输入值 $Y_1, Y_2, \cdots, Y_m$ 和输出值 $X_1, X_2, \cdots, X_n$（图 3.3）．如果把这样一个系统的行为观察一段足够长的时间，而且如果必要的话，还可以做一些主动实验[1]，那么就可以充分了解这个系统，从而对于输入的任何已知变化预测到输出的变化．不管对黑盒的行为研究得怎样仔细，都不可能推出关于黑盒内部结构的正确结论，因为其他不同的系统也可以产生同样的行为．

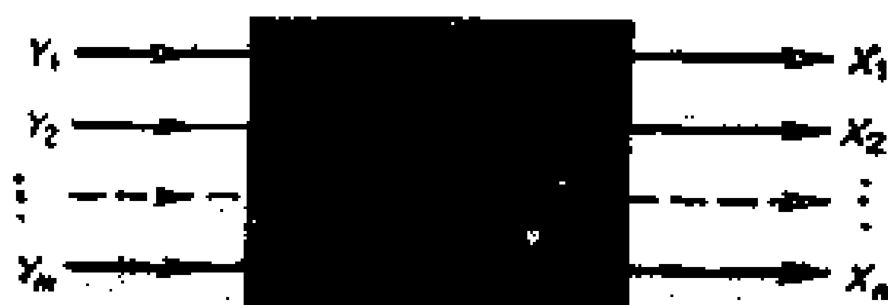


图 3.3． “黑盒”

具有同样的输入值和输出值，并且对外部激励有同样反应的系统，称为同构的系统．显然，对于只能掌握系统输入值和输出值的观察者来说，两个同构系统是不可区分的．同构的一个例子是，实验者无法区分第 3.1 节中的气体温度计和热电温度计，不管他如何实验，当然，除非他“打开这个黑盒”．

系统 A 和 B 同构的条件，可以用下列方程组来表达：如果对于任何时刻 t 来说有

$$Y_{1A}(t) = Y_{1B}(t), \quad Y_{2A}(t) = Y_{2B}(t), \cdots, \\ Y_{mA}(t) = Y_{mB}(t), \tag{3.1}$$

1）所谓主动实验是指，观察者（实验者）为研究系统的行为，在系统的输入处施加一些作用，以有别于仅仅观察系统行为的被动实验．

那么

$$X_{1A}(t) = X_{1B}(t), \quad X_{2A}(t) = X_{2B}(t), \cdots,$$
$$X_{mA}(t) = X_{mB}(t).$$

这样，用黑盒方法来研究系统，是不可能得到关于系统内部结构的明确结论的，因为被看作黑盒的一个给定系统的行为，和所有与它同构的系统的行为并无区别。我们必须记住，对于任何具体系统来说，可以选出无穷多个与它同构的具体系统。

显然在任何一些同构系统之间，都存在原型-模型关系，就是说一批同构系统中的任何一个，都可以看作是其他系统的原型或模型；看看系统在使用中的前后关系，就可以确定它在这一关系中的性质，是原型还是模型。同构的条件不一定是模型与原型间的对应条件。即使系统 A 和 B 之间的对应，不象条件（3.1）所要求的那么完全，系统 A 仍可以是系统 B 的行为的一个模型。

“黑盒”概念在科学和工程中得到了广泛的应用，但并不总是采取上述明显的形式。其实黑盒可以是任何对象，只要是仅根据对其外部性质的研究来对它进行判断的，而不研究它的细致结构，以及组成所研究对象的更细致的元件的性质。例如，我们制造和使用导电体而不深究电流通过金属的机制的细节；为培育植物而发展起来的农业方法是以研究植物的行为为基础的，而不是以研究植物的分子结构为基础的。

黑盒方法在研究复杂系统的行为时特别重要。控制论系统都是复杂的，所以黑盒方法对研究控制论系统，自然地是有重要意义的。

3.3. 简化模型

对于一个特殊问题来说，决定系统状态的各个坐标并不

是同等重要的。如果不去考虑那些不重要的坐标，那么代替具有 n 维状态空间的初始系统 A，我们就得到一个具有 $n'(n'<n)$ 维状态空间的简化系统 B. 对于系统 A 的每一个给定状态，将存在着系统 B 的一个对应状态(因为那些不重要的坐标的给定值，并不妨碍用系统 A 的重要坐标来确定 B 的状态)。但是对于系统 B 的每一个确定状态来说，就不存在系统 A 的唯一对应状态，因为给出系统 B 的状态后，我们并不能决定 A 的那些不重要坐标的值。所以对于这些不重要坐标值的任何组合来说，系统 A 的所有状态都将对应于系统 B 的一个状态，这个状态是由那些重要坐标的给定值确定的。

初始系统的简化，也可以通过把一些状态归并成一个状态来实现。例如，不去考察状态空间中的代表点的一切可能位置，而是把状态空间划分成小区域，一块区域取一个点代表这个区域，就可以使问题得到简化。这种代换相当于在系统 A 和系统 B 的状态之间建立明确的对应，但反向来看(在系统 B 和系统 A 之间)，对应就不是唯一的了。

从图 3.4 可以看到，给出了系统 A 中点 a 的坐标，我们就唯一地定义了决定系统 B 的状态的那个正方形 [正方形

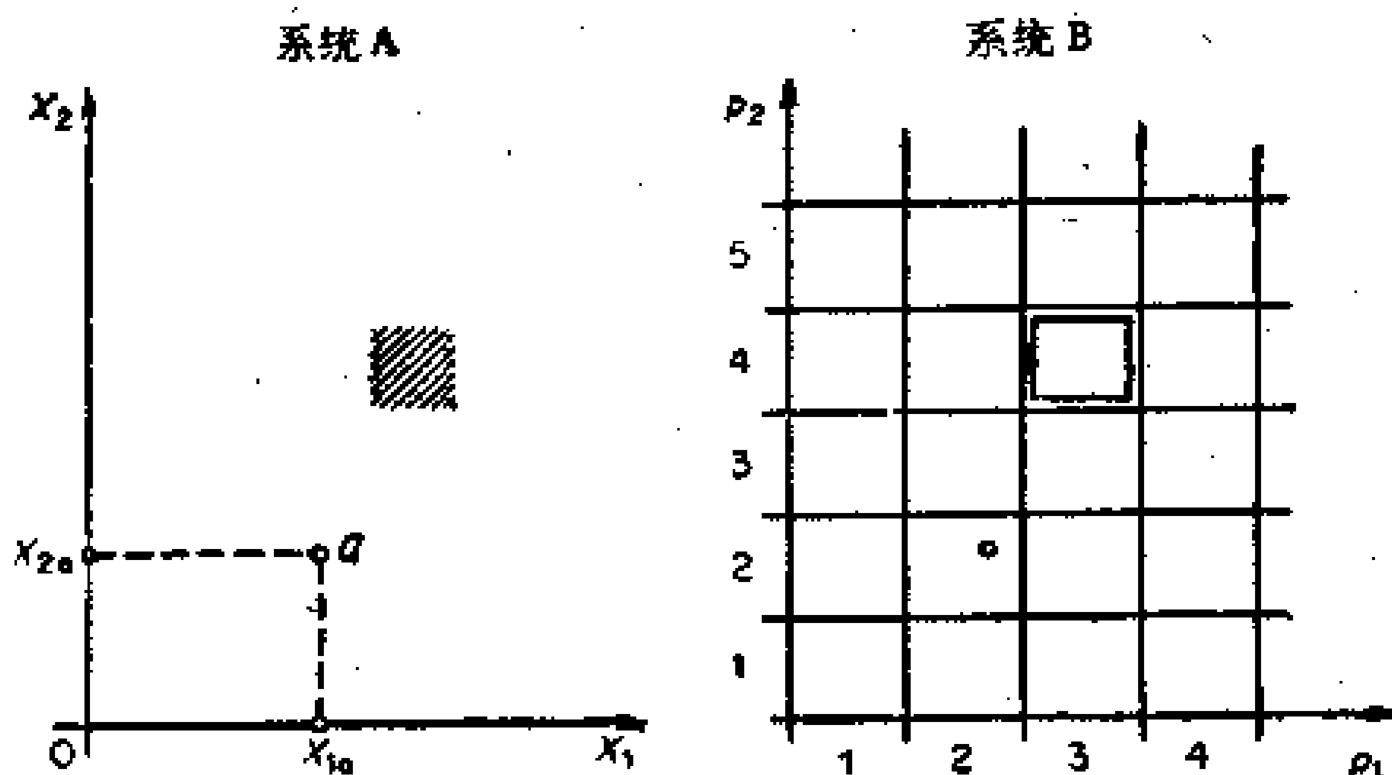


图 3.4. 两个系统的状态空间的同态

(2,2)]. 但是,给出了系统B中的一个正方形,我们却不能唯一地决定系统A中的那个点的位置. 这是因为在系统A的状态空间中,画有阴影的区域上的所有状态,都对应于系统B的给定正方形(3,4).

通过简化(减少所考虑的坐标个数或比较粗糙地估计系统的变量的值),从初始系统A得到的系统B,叫做系统A的**同态模型或简化模型**. 在原型A及其同态模型B之间的关系,并没有同等的有效性,因为A不能看作是B的同态模型.

作为例子,我们考察一台制造轴承钢珠的机器. 对于这台机器的操作者说来,重要的变量是:产量、钢珠直径离额定直径的偏差、能量消耗、润滑系统中的压力和冷却切削工具用的乳状液流. 但是,控制整个工厂的调度员,只对这台机器的较少数目的变量感兴趣. 例如,在任何时刻,他只对这台机器处于下面三个状态的哪一个感兴趣:

状态1——机器不在工作.

状态2——机器在工作,而钢珠直径在容许范围内.

状态3——机器在工作,但钢珠直径超出了容许范围.

这台机器最初的状态空间,它含有机器的一切坐标的一大批值,现成被换成仅由以上三个状态组成的一个空间,这个替换表现了从原型系统到它的同态模型的一种变换,即表现了同态性.

3.4. 类似系统

如果B应当是A的一个模型,那么只要系统B的至少一个输出值按某一标尺对应于系统A的一个输出值就够了,同时要求,这两个系统的输入条件之间保持一定的对应. 对模型的这些要求可以表达为条件

$$B \sim A,$$

这时

$$Y_{1A}(t)=k_1Y_{1B}(k_0t),$$
$$Y_{2A}(t)=k_2Y_{2B}(k_0t),$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots$$

在输出坐标中至少可以找到一对 X_{jA} 和 X_{jB}，使得如果对于某一时刻 $t=t_0$ 来说，这个系统的状态之间有一个对应，那么对于任何其他时刻来说就有

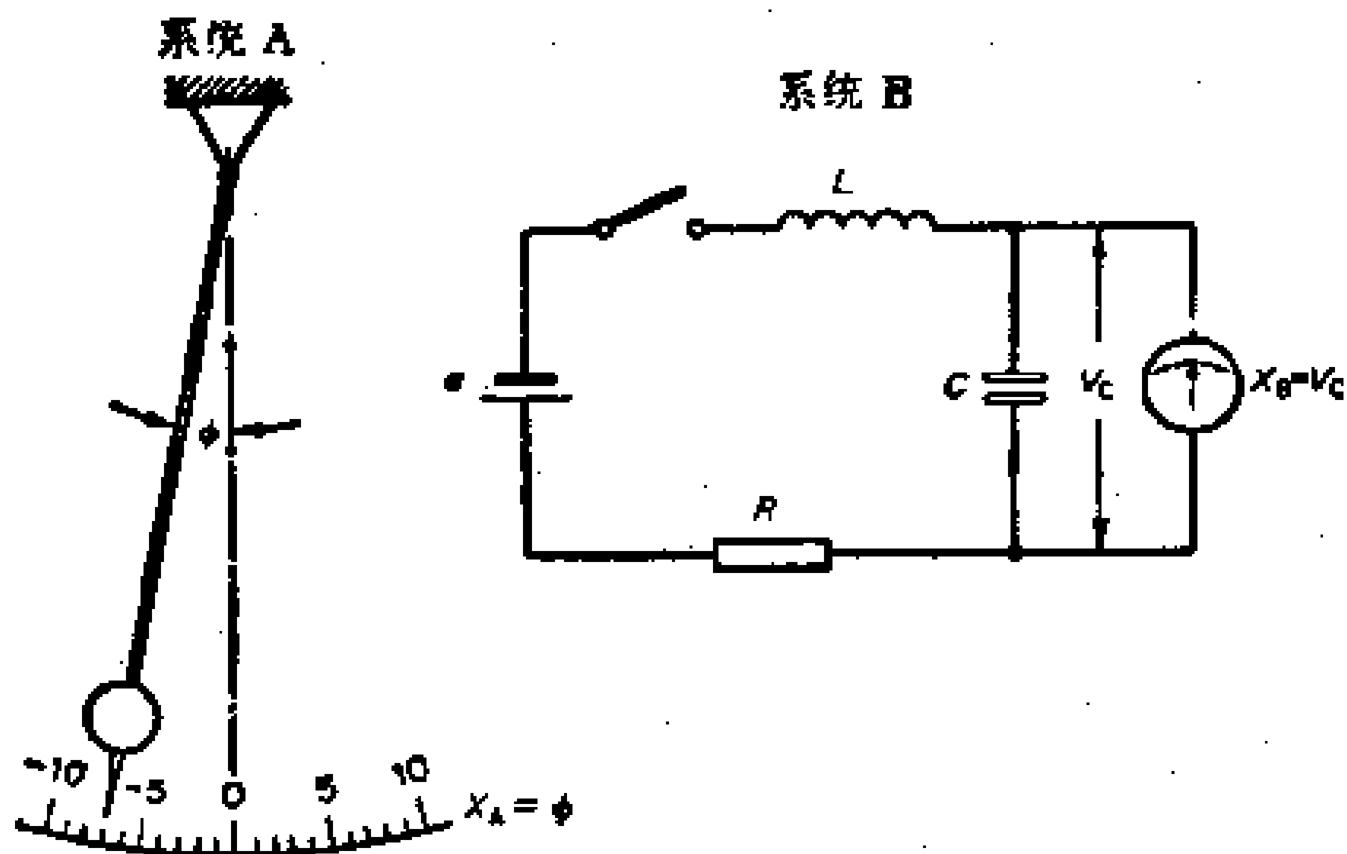
$$X_{jA}(t)=kX_{jB}(k_0t), \quad (3.2)$$

这里 k, k_0, k_1, k_2, $\cdots$ 是比例系数.

满足条件 (3.2) 的系统叫做类似系统. 例如一个摆和一个电振荡线路就是类似系统，先把两个系统从平衡位置移开，然后不让它们再受干扰，它们的输出值(X_A——摆偏离铅垂线的角度，X_B——电容器上的电压)就进行阻尼正弦振荡，见图 3.5 (X_{Ai}, X_{Bi}——变量 X_A 和 X_B 的初始值).

性质和结构不同的系统，它们的同态模型的行为的某些特征之间，存在着形式上的相似性，这导致了类似系统的存在. 只有在建立初始系统的同态模型的过程中，进行了广泛的简化以后，才能出现这种相似性. 如果试图省去某些简化，那么类似性就可能丢失. 例如，如果把摆悬挂处的干摩擦，或振荡电路中产生的电磁波辐射考虑进去，那么坐标 X_A 和 X_B 的运动形式就不再类似了.

原型 A 及其类似物 B 的类似坐标(更精确地说，同态模型 A 和 B 的坐标)叫做代表值. 相应的代表值之间的关系，是由比例系数 k_1, k_2, $\cdots$ 给出的. 每一系数都表示，几个单位的模型代表值，相当于原型中相应量的一个单位测量值. 在所考察的那个例子中，比例系数是把电容器上的电压和摆的偏角联系起来的，它指出多少伏特的 V_c，对应于摆的偏角 ϕ 偏转一度. 这个系数的量纲是(伏特/度).



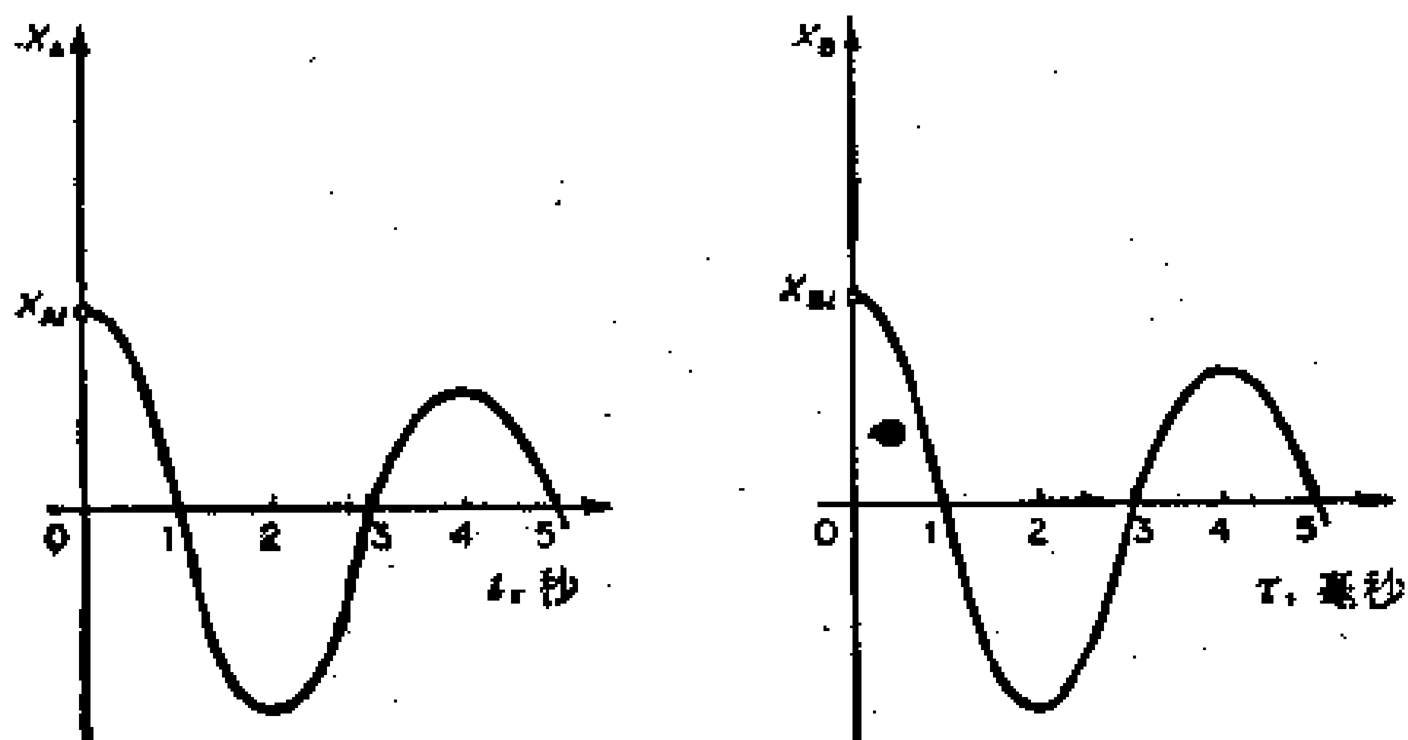


图 3.5. 类似系统：A：机械的(摆)，B：电的(振荡电路)

在原型和模型中的过程中，时间标尺上的区别，取决于无量纲系数 k_0，它指出模型中的过程比原型中的过程快多少倍。

表 3.1 给出了用来模拟被控系统中的过程的一些类似系统。

在最近十年间(本书出版于 1967 年——中译者注)，已经广泛使用了一种通用类似模拟装置(图 3.6)，对复杂控制系统

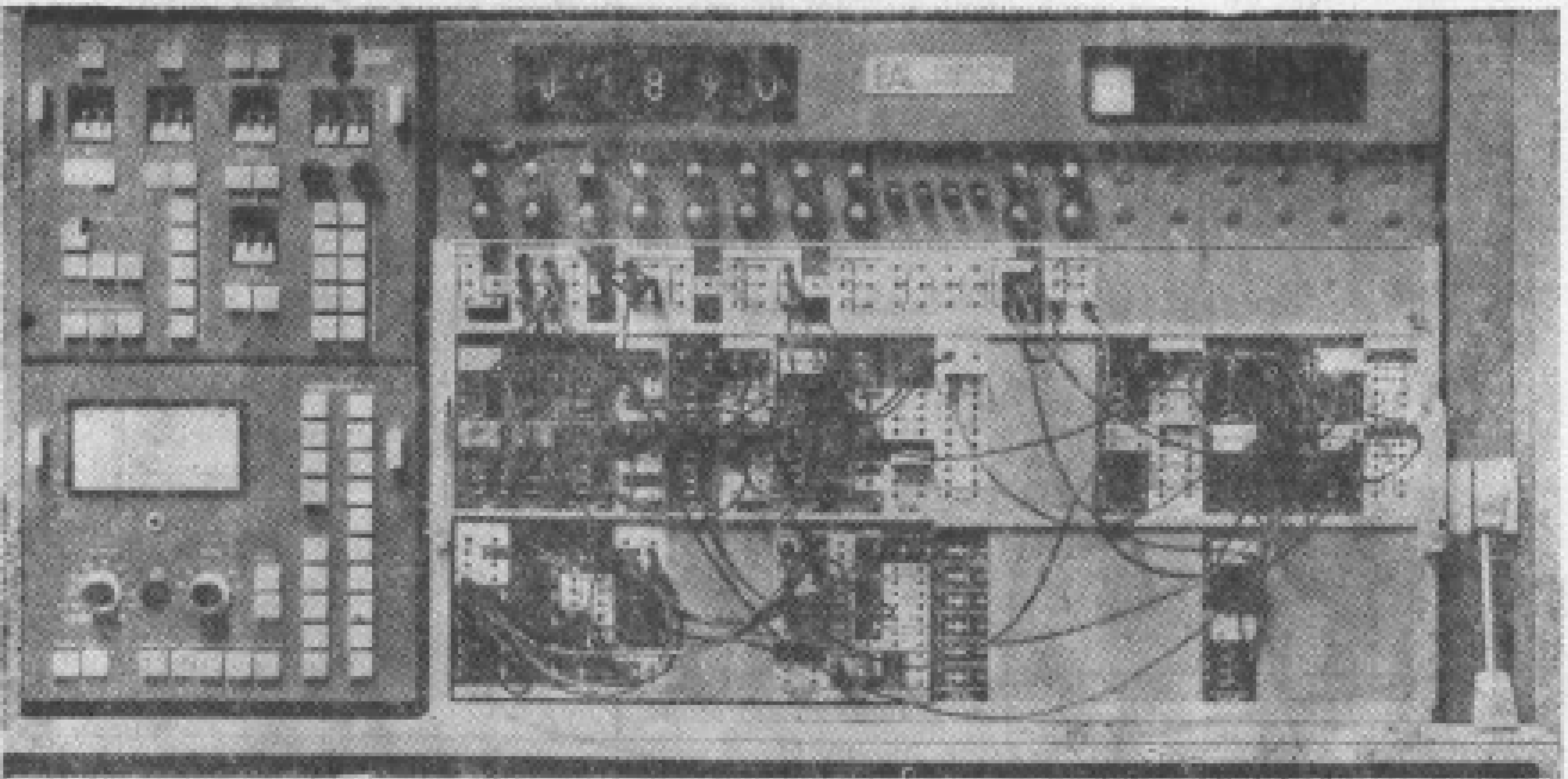


图3.6. 通用类似模拟装置(这张照片承蒙电子联合有限公司提供)

表 3.1 类似系统

机械模拟	气动模拟	电模拟
$X_1=\Delta l$ $X_2=F$	$X_1=\Delta l$ $X_2=p$	$X_1=I$ $X_2=\phi$
$X_1=F$ $X_2=v$	$X_1=F$ $X_2=v$ r	$X_1=I$ $R=$常量 $X_2=V$
$X_1=F$ m $X_2=v$	—	$X_1=V$ L $X_2=I$
$X_1=F_1$ $X_2=F_2$	$X_2=F_2$ $X_1=F_1$	L_1 L_2 $X_1=V_1$ $X_2=V_2$
$l=$常量 $m=$常量 $X_1=\overline{F}$ $X_2=A$	—	$L=$常量 $X_1=V$ $X_2=I_0$ C

中的过程进行科学研究和工程计算．这种装置是用一些电子放大器、电容器和电阻的组件制成的．适当地把它们连结起来，这些元件就可组成很广泛的一类系统的类似模型，它使我们能够通过观察模型的行为，从而比较这些原型系统在各种条件下的行为．

3.5. 数学模型

一个系统的数学模型，是这个系统在某种形式语言中的描述，这种形式语言，当我们用形式程序对系统进行描述时，

应能够对系统行为的一些特征得出结果.

数学描写不可能是无所不包的，也不可能是完全精确的，所以数学模型不是描写真实系统，而只能描写它们的简化(同态)模型.

存在着各种类型的数学模型，有些数学模型可以通过函数关系或图象给出系统的基本性质. 方程也可以描写系统的运动，而图和表则表示系统从一些状态到另一些状态的变换，等等.

例如，一台感应电动机的数学模型，可用它的特性曲线族给出，如图 3.7 所示，此特性曲线表示，对于所加电压的各种值 V_1, V_2, ···，电动机转矩M与角速度 ω 的关系. 使用这一模型，就可以预测速度(每分钟转数)将怎样随负载的不同和供电电压的不同而改变，等等.

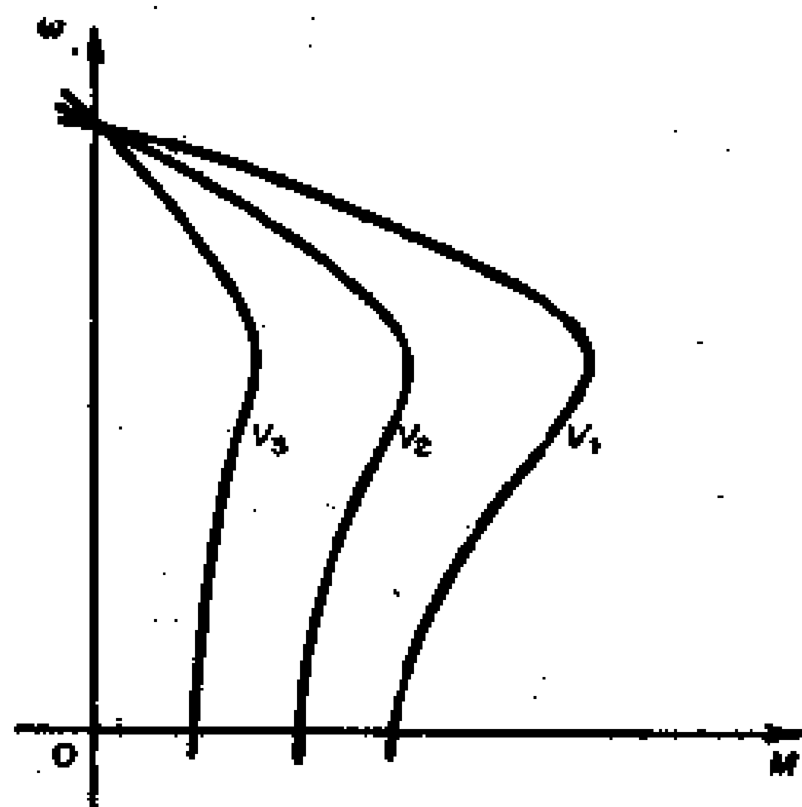


图 3.7. 感应电动机的特性曲线族

牛顿表达式

$$F=\frac{m_1m_2}{r^2},$$

这里 m_1 和 m_2 是相距为 r 的两个质点的质量，F 是它们间的相互作用力，可以看作是由两个质点组成的系统的数学模型，

因为这个表达式确切地表示了在各种条件下二质点的相互作用。

如果一个系统相继通过不同状态，那么这个系统的行为可以用转移图[1]或转移表来表示。例如一株植物的生活循环的数学模型可以(非常简化地)表示如图 3.8 所示的图(graph)的形式。图中节点表示系统的状态，箭头则表示从一组状态到另一组状态的转移。"种子"状态表为 a，"植物"表为 b，"开着花的植物"表为 c，从这个状态出发，系统可以变为状态 e——"未授粉的植物"，也可以变为状态 d——"已授粉的植物"，作为 d 的结果又得到初始状态 a——"种子"。

图 3.8 所表示的变换序列，也可以列成一张表（表 3.2），这种表也可以当作是该系统的数学模型。

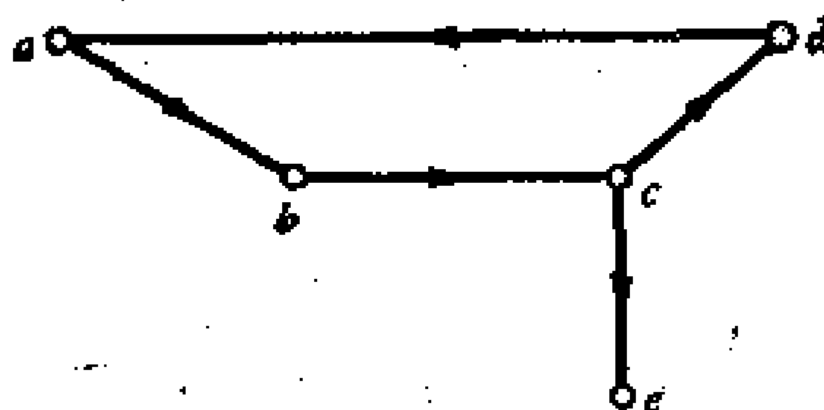


图 3.8. 一年生植物的生活循环的图示(以图的形式表示)

可以看出，从系统的状态 c 出发，不是变为一个状态，而是变换两个状态 d 和 e。这意味着这个变换取决于某个特殊的原因因子；在本例中，这取决于花是否授粉。要考察所有导致授粉的因子，预测对于每株植物来说是否授粉，显然是困难的。但是对于一大批植物来说，统计资料可以预测授粉的平均频率。于是，已授粉植物对于足够多的植物总数的比值，值 p，将表征每株植物的授粉概率。值 $1-p$ 就是各株植物未授粉

1) 转移图表示了所谓图（graph）。图的定义和有关概念将在第 15.1 节中给出。

表 3.2

	a	b	c	d	e
a				←	
b	←				
c		←			
d			←		
e			←		←

的概率.

对于行为取决于随机因子的系统来说，不仅必须指出系统所走向的状态，还必须指出这个转移的概率.

就所考察的这个例子来说，系统的统计模型如表 3.3 所示.

表 3.3

	a	b	c	d	e
a				1	
b	1				
c		1			
d			p		
e			$1-p$		1

练习

1. 在下面所列的对象中，哪些可看作是原型，哪些可看作是模型？在什么意义上可以这样看？(a) 书，(b) 太阳系，(c)

振荡电路，(d) 原子，(e) 钟的摆(钟的摆轮)，(f)唱片，(g) 计算机的存储器。

解：书、唱片和计算机存储器是模型。太阳系、振荡电路、原子和钟的摆(钟的摆轮)是原型。

2. 照相底片和从它印出的照片同构吗？

解：是的。

3. 试举出与电磁伏特计同构的一些系统的名字。

解：下列系统：热伏特计、磁电伏特计、静电伏特计和电动力伏特计。

4. 一架典型的工厂出品的无线电接收机包含有若干电子管，一批电阻、电容和线路。通常基本电路是翻印在两页书上的。线路所占据的空间可以用建立同态模型的办法大大简化吗？如果可以，应该怎样简化？(考察超外差式接收机的情况)。什么东西可以成为这种接收机的同构模型？

解：我们可以用图 3.9 所示的方框图作为同态模型。任何一架超外差式接收机的其他电路，也都可以用来作为这种接收机的同构模型。

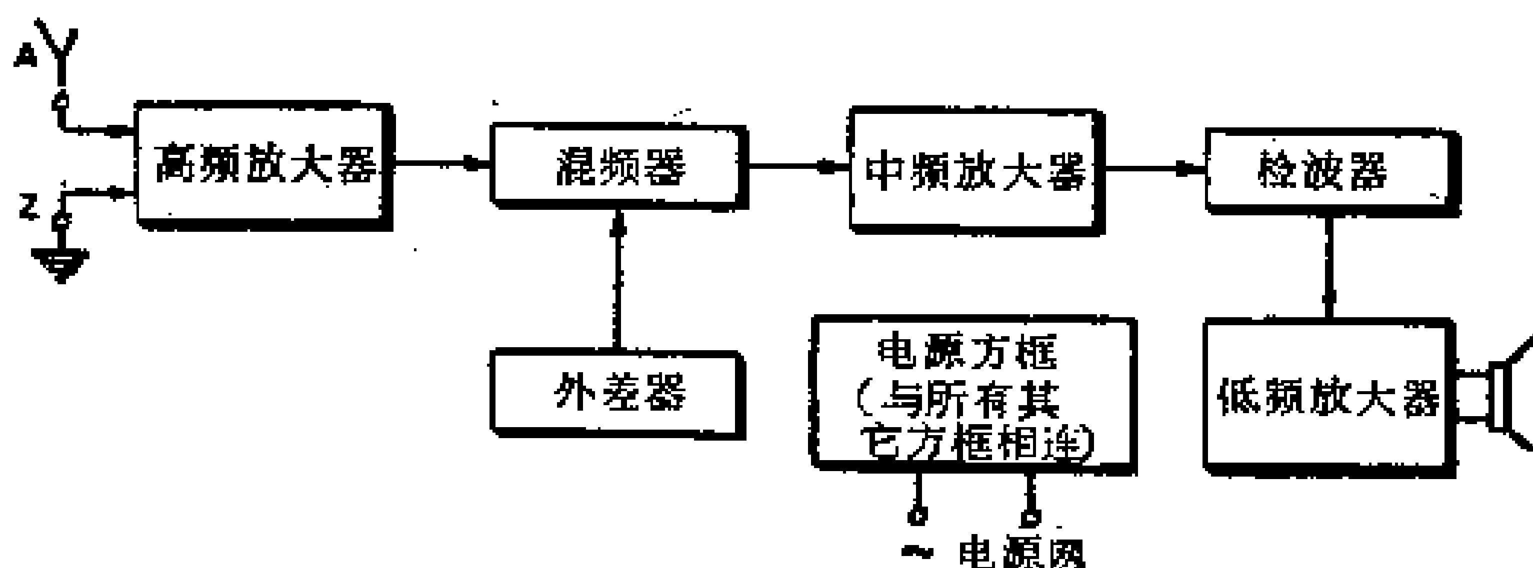


图 3.9. (第 4 题)

5. 根据表 3.1 作出下列机械系统(图 3.10)的一个电的类似系统。

解：所求电的类似系统给出于图 3.11。

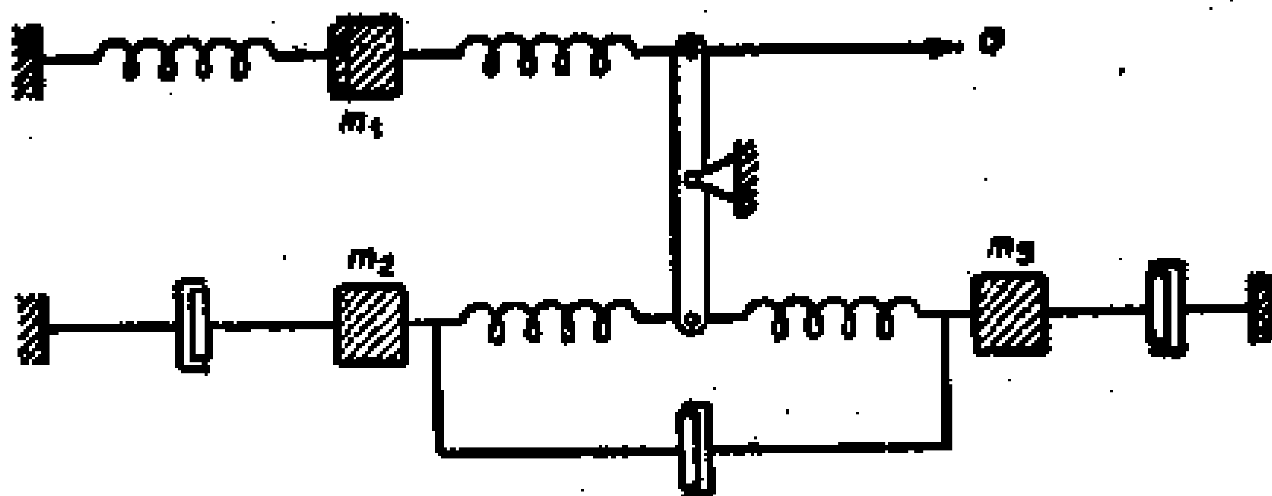


图 3.10. （第 5 题）

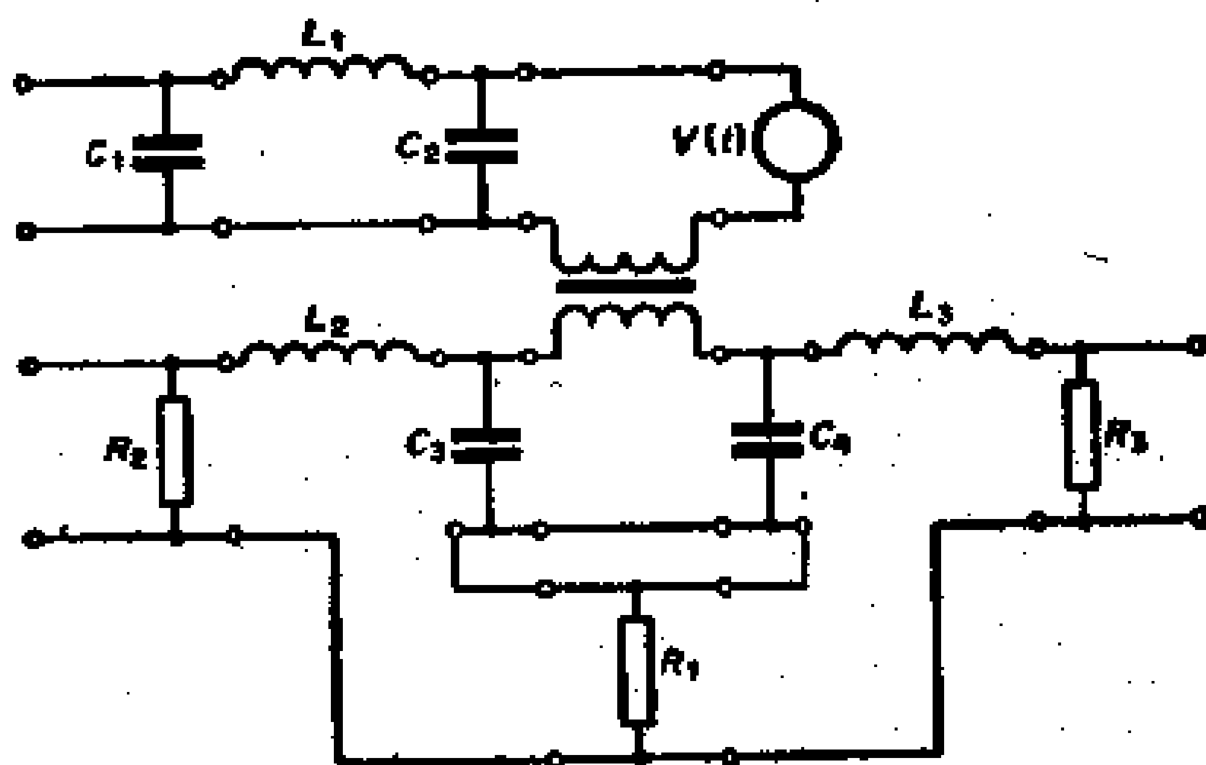


图 3.11. （第 5 题）

6. 设 A 和 B 这两个系统的工作由下面两张转移表（系统 A 和 B 的数学模型）给出：

A

↓	a	b	c	d
x	b	a	b	c
y	a	b	c	b
z	a	b	b	d

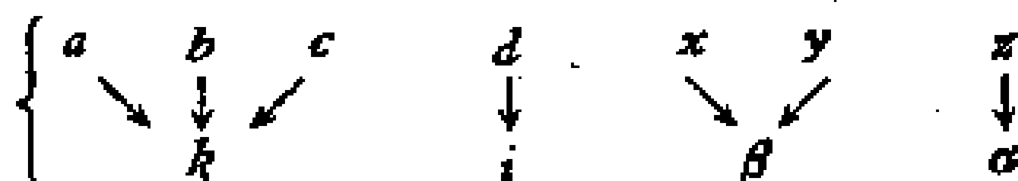
B

↓	i	k
α	i	k
β	k	k

这两张表的顶行表示运算对象，最左一列表示算子，箭头表示转移的方向。试证明这两个系统同态。

提示：试找出把系统A的元素变为系统B的元素的变换。

解：要证明这一点，只要构造下列算子就够了．这个算子把系统A的元素变为系统B的元素．



这样一来，系统A的转移表可以改写如下：

A

↓	k	k	k	i
β	k	k	k	k
β	k	k	k	k
α	k	k	k	i

容易看出，在删去重复的行和列以后，得到的正是系统B的转移表。

第四章　动 态 系 统

在研究控制系统的行为时，必须考察系统的运动或可变性——系统的状态变化．但是，如果在组成系统的元件之间没有能量或物质的变换或传递，那么任何系统的状态都是变化不了的．例如，要改变一个物体的温度，就需要改变它的内能；要改变容器里液体的液位，就需要改变其中液体的数量．如果一个动物想在一段有限时间里改变它的空间位置，它就必须运动，这又要求一定的动能储备．

如果一个系统的状态可以瞬时地变化的话，这就意味着，系统中贮存的能量或物质，在一段无限短的时间里增加了一定的数量，如果发生了这样的事，那么通过系统的某些元件的能量流或物质流的强度就应当是无穷大，但这是不可能的．所以一个“真实”系统的状态是不能瞬时地变化的，这种变化需要一段有限的时间．这是某一个具体过程的结果，我们把这个过程称为过渡过程．

如果在系统中，从一个状态变到另一个状态的转移不能瞬时地完成，它只能作为过渡过程的结果而出现，那么这类系统叫做动态系统．从上面所述来看很清楚，严格地说，一切真实系统都是动态系统．但是如果过渡过程的持续时间，与所研究现象的持续时间相比，可以忽略不计，而过渡过程的性质对系统的行为也没有重大影响的话，就不必考虑该系统的动态性质；可以假设状态的变化是随着产生它们的原因而瞬时地出现的．

4.1. 动态系统的体制

必须区分系统行为的三种特征，即动态系统的三种可能体制：平衡体制，过渡体制和周期体制.

如果一个系统的状态不随时间的推移而改变，我们就说这个系统处于平衡. 平衡状态是这样一种状态，在这种状态下系统的每一坐标都不变. 在状态空间里，系统的平衡状态表现为静态点，但是显然，并非状态空间中所有的静态点都是平衡点. 作为例子，我们来看看船相对于它的纵向水平轴的运动（图4.1）.

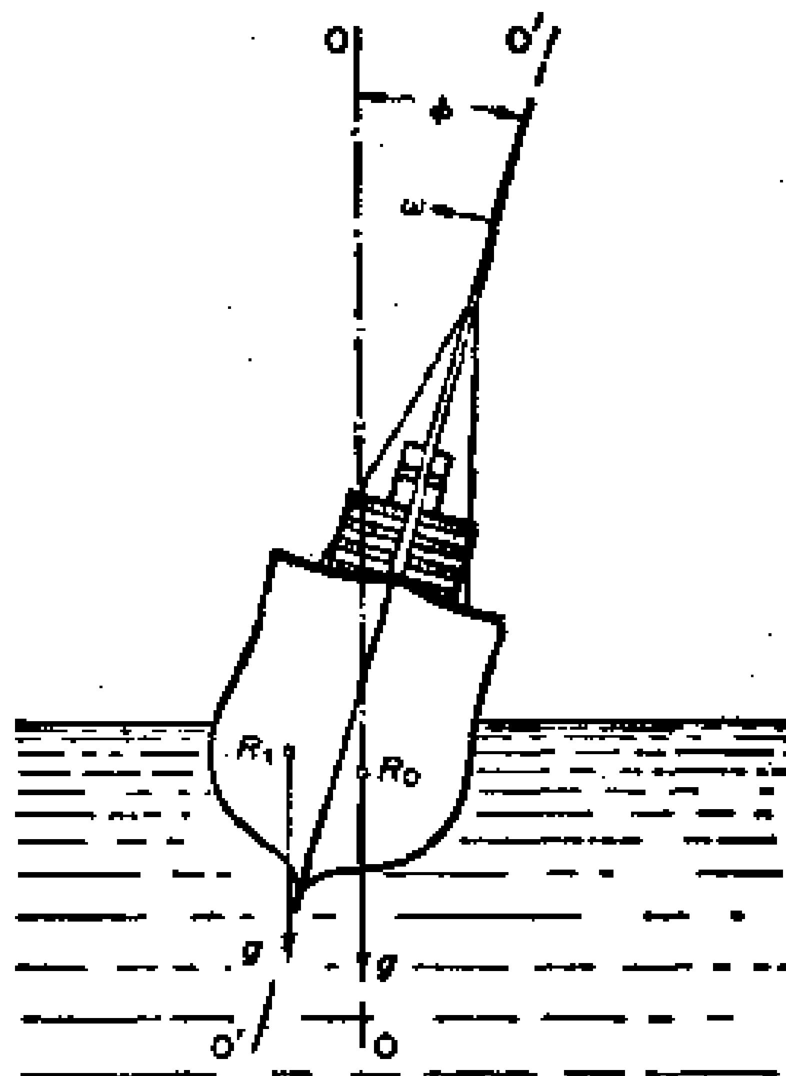


图 4.1. 船相对于其纵轴的运动

这个系统的状态取决于它的两个坐标：船的竖直轴 $O'-O'$ 与指向地心的直线 $O-O$ 间的夹角 ϕ（图 4.2）和船的竖直轴的转速 ω.

这样一个系统的平衡状态，只能出现于船的下述位置上：船的重心 R 在 $O-O$ 轴上（位置 R_0），而转速 $\omega=0$. 点 a_0 描写了系统的这一平衡状态，这时其坐标为 $\omega=0$; $\phi=\phi_0$. 如果船上装的一部分货物从左舷移动到了右舷，那么船的平衡位置就改变了，这时就要用（譬如说是）坐标为 $\omega=0$, $\phi=\phi_1$ 的点 a_1 来表示它，但是不管货物如何摆法，这个系统总是只有一个平衡状态.

所谓“过渡体制”是指动态系统的这样一种运动体制，它

从某一个初始状态变到任何稳态体制——平衡体制或周期体制． 在外力变化或系统的内部性质变化的影响下，系统中就出现过渡体制． 例如在上述系统中，过渡状态的出现，可能是由于刮风(风将改变船的倾角)，或是由于船的重心位置 P 改

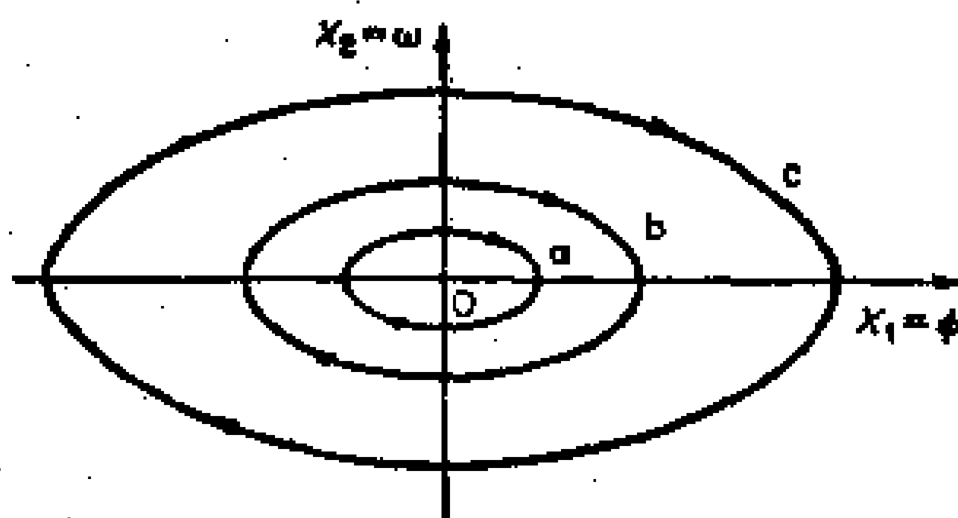


图 4.3. 船相对于它的纵轴的无阻尼振荡的轨迹

周期体制是这样一个体制,在这体制下,系统将在相等的时间间隔以后回复到相同的状态.对于所研究的系统来说,在下面两种情况中可以出现周期体制:在波的作用下(强迫周期体制)和当水与船间不存在摩擦时(自由体制,无阻尼振荡).在这种系统中,无阻尼的自由振荡,只有对运动过程进行抽象的、因此也是近似的研究时,才是理论上可能的东西. 在周期条件下,所考虑的系统的可能运动的轨迹,如图 4.3 所示.

4.2. 相空间

要在任意的一个状态空间里,对一个动态系统的行为进行有效的研究,是不可能的. 如果状态空间的坐标是任意选出的,那么这个系统的运动可能被证明是不可预测的.

例如,我们来看看一个带有放大器的液压拖动装置系统的行为,如图 4.4 所示. 这个系统由阀 S_1, S_2 与汽缸 C_1, C_2 组成,它们是这样互相连结的,阀 S_1 的位置 Y 决定汽缸 C_1 中活塞的位移速度,而由汽缸 C_1 所推动的阀 S_2

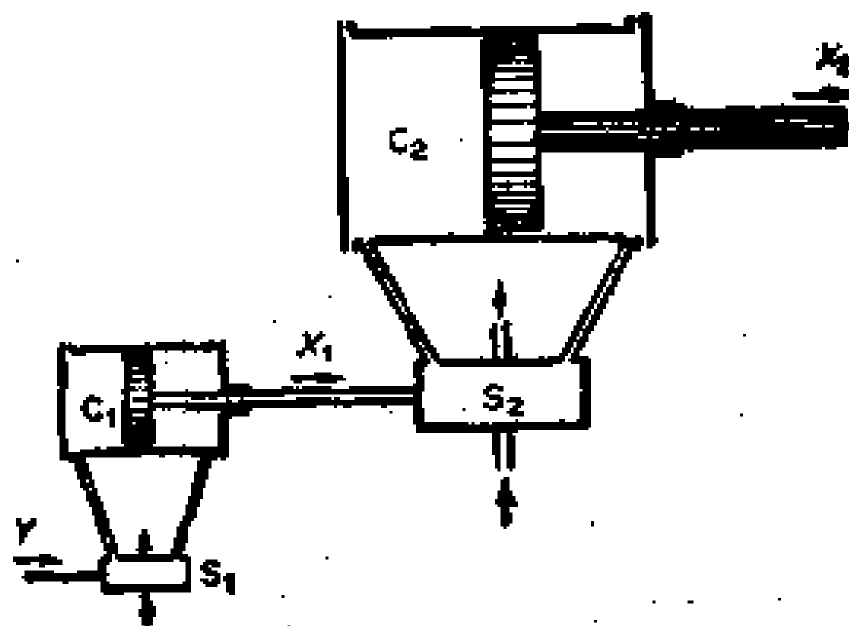


图 4.4. 带有放大器的液压拖动装置

的位置，又决定汽缸 C_2 中活塞的运动速度．汽缸 C_2 的活塞位置 X_2 将被看作输出值，而阀 S_1 的位置 Y 则被看作是输入值．

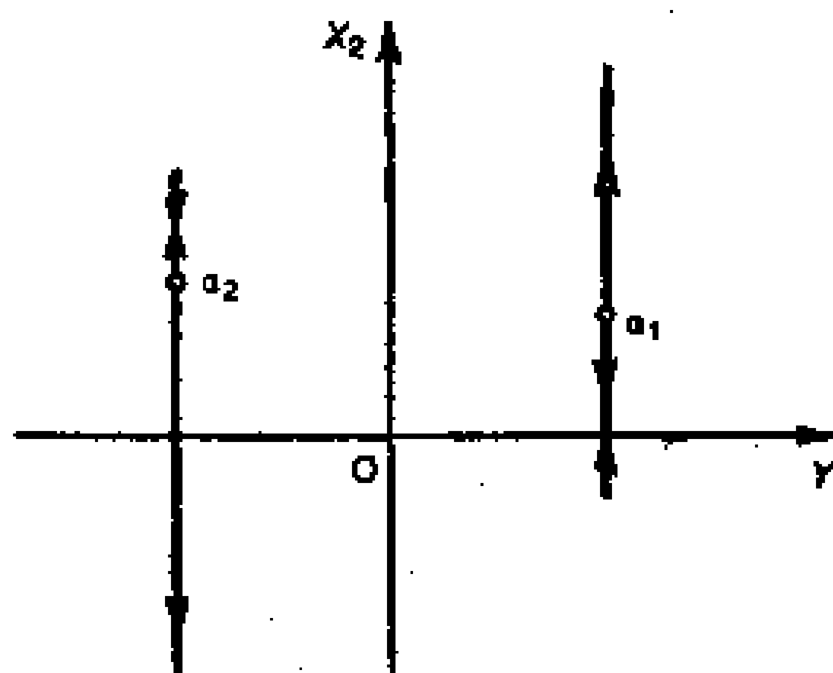


图 4.5．液压拖动装置的输入变量和输出变量空间

我们假设，观察者试图通过研究 Y，X_2 平面上代表点的运动轨迹（图 4.5），来分析系统运动服从的规律．将可以看到在许多情况下，系统的输入 Y 和输出 X_2 的同一位置，例如由点 a_1 表示的位置，对应着不同的代表点轨迹．

有时活塞将从这一位置向右运动，有时则向左，有时活塞开始时向一边运动，然后停止，再开始反向运动．系统行为的这种不可预测性，使观察者失去研究系统性质的可能，从而造成了研究这种现象的一个障碍．在上述例子中，这一点可由下列事实来说明：观察者在研究时并未引入坐标 X_1，而坐标 X_1 却表征着阀 S_2 的位置的．在 Y，X_1，X_2 空间里，每一个固定的输入值 $Y = Y_i$ 都对应着一族互不相交的轨迹，它们明确地决定该系统从任何初始状态出发的运动，如图 4.6 所示．

如果在一个空间中，系统的运动能表示为互不相交的轨迹，使得在不变的外部作用下，系统的每一个初始状态都唯一地确定系统的过程，那么这种空间叫做**相空间**，而这一空间的坐标叫做**相坐标**，表现系统运动的相轨迹族叫做**相图**．任何动态系统的相空间都完全为相轨迹所充满，即过这个空间的每个点都有一条轨迹，虽然为简明起见只画出其中的一部分，例如在图 4.6 中的那一族相轨迹．这幅图也表明，改变加在系统上的外力，就可以大大地改变系统的相图．容易看出，第

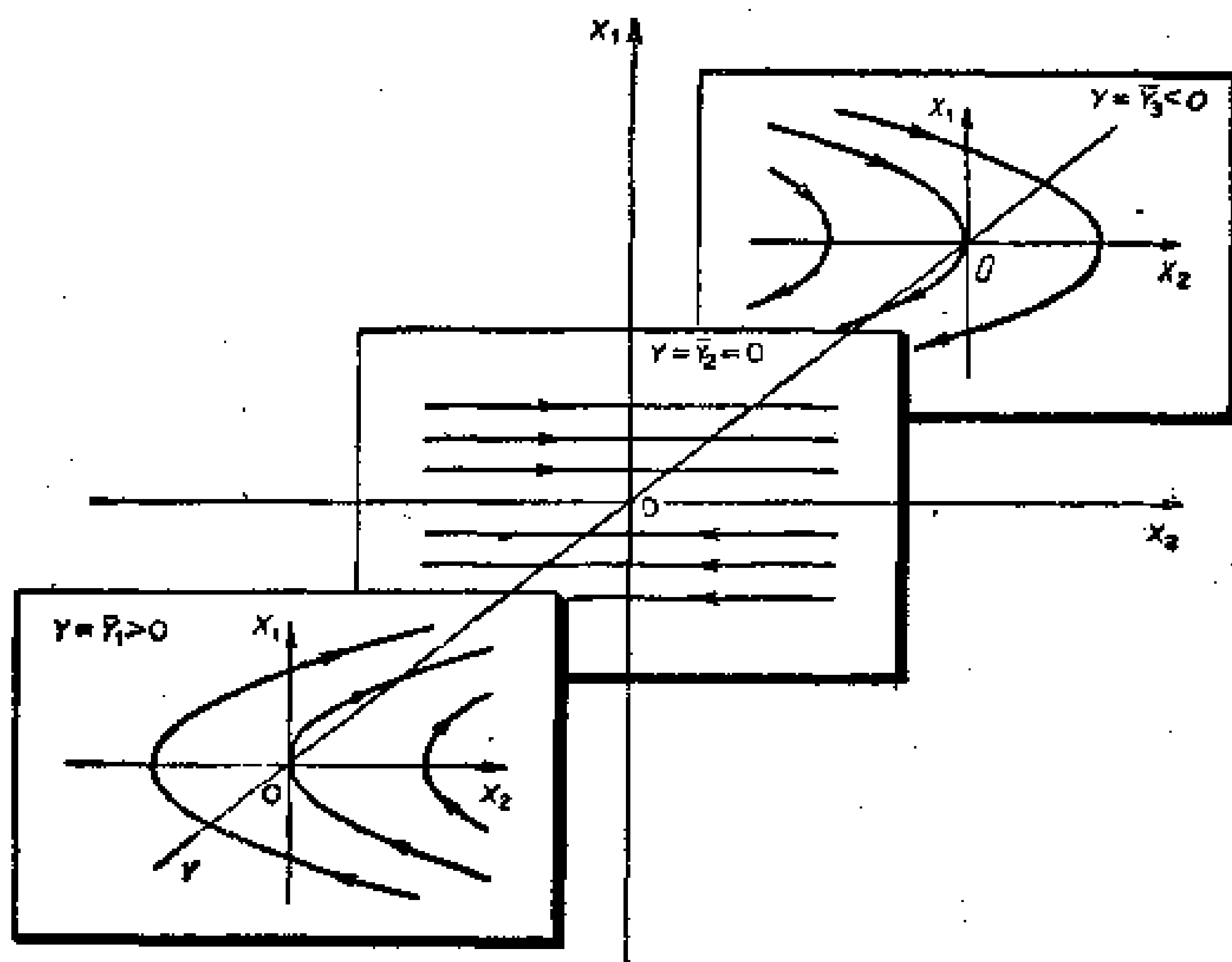


图 4.6. 带有一个放大器的液压拖动装置的空间

4.1 节中所述的船的横滚运动可在相空间中表示出来，图 4.2 中所示的轨迹是相轨迹，而图 4.3 中的那族轨迹就是该系统的相图.

系统相空间的维数叫做系统的阶. 图4.1与图 4.4 上所示的系统的运动，可以唯一地在二维相空间中表示出来，所以这两个系统可以看作二阶系统.

更复杂的系统是高阶系统，它们的相空间就必然有较高的维数. 例如，如果对图 4.4 上所示的液压拖动装置，再配备几个附加放大级，那么这个系统将增加到 n 阶，n 等于拖动装置中的汽缸个数.

4.3. 相图的作法

动态系统的相轨迹可以根据实验数据画出. 为此我们要

测出输入值固定时系统在运动期间的相坐标。代表点的位置将由给定时刻的坐标值来确定。对系统的各种初始状态研究这些过程，就可以找到一组相轨迹，从而作出系统的相图。

例如，要画出图 4.3 中的三条相轨迹，可以对船的摇摆运动进行三次实验，用陀螺仪记下船轴的倾角 ϕ 和倾角的变化速度 ω。陀螺仪的记录已复制在图 4.7 中：a 表示小振幅，b 表示中等振幅，c 表示大振幅。对于每一对曲线 $\phi(t)$ 与 $\omega(t)$，都可以从函数 $\phi(t)$ 与 $\omega(t)$ 中消去时间 t，从而画出相轨迹 a，b，c（图 4.3）。

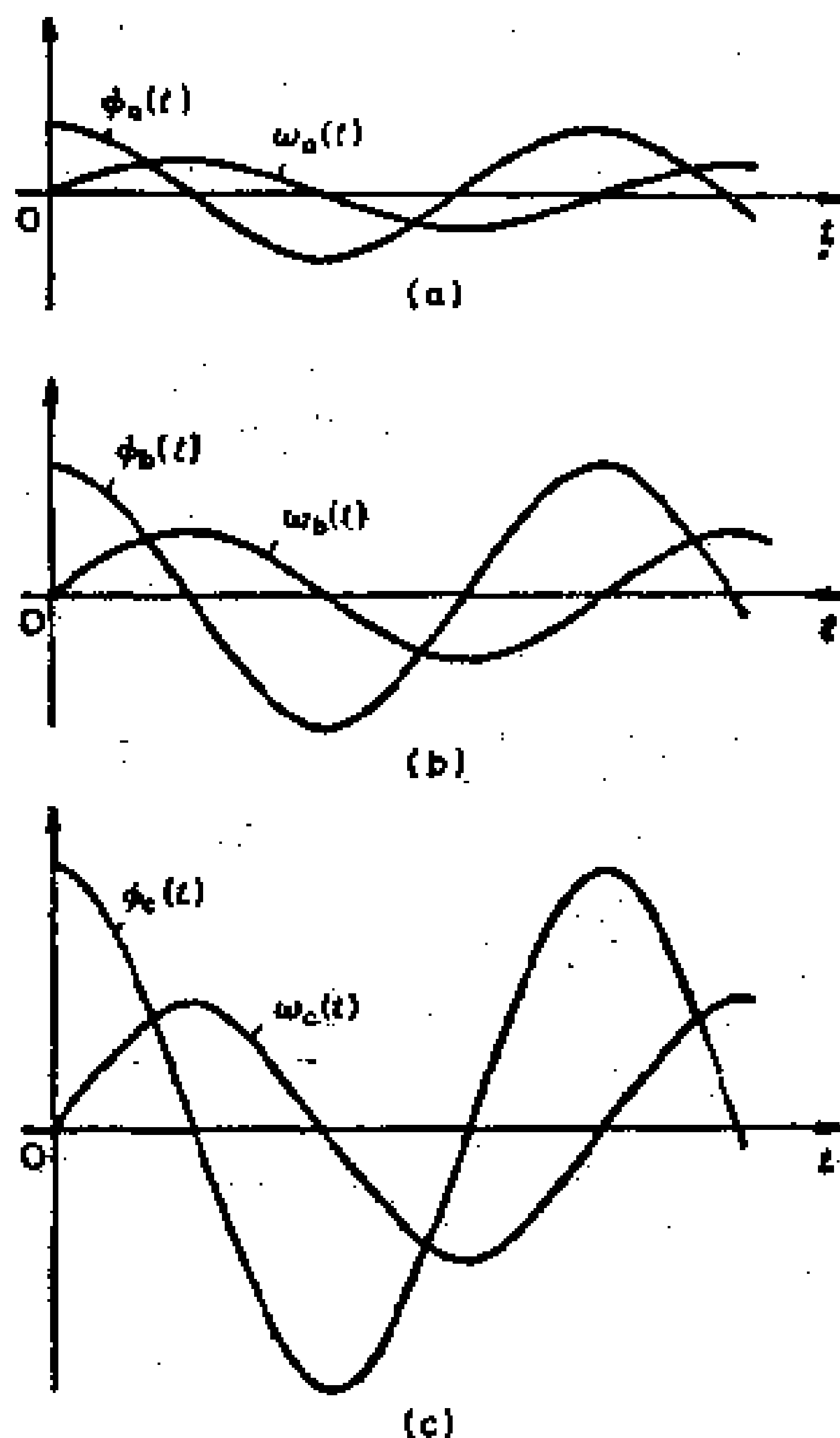


图 4.7. 船摇摆期间三种可能运动的记录

如果可以用适当方程来描写一个动态系统的行为，那么就能用解析方法得到这个系统的相图. 例如，对第 4.2 节中描写的液压拖动装置来说，可以用下列方式作出图 4.6 所示的那族相图.

设 k 表示活塞的运动速度和控制阀位置间的比例系数. 那么对于阀 S_1 的一个固定位置 $\bar{Y}$ 来说，活塞杆的位置(坐标 X_1)将按规律

$$X_1(t) = X_{10} + k\bar{Y}t \tag{4.1}$$

而变化，这里 $X_{10} = X_1(0)$ 是坐标 X_1 的初值. 类似地，对于坐标 X_2 来说，我们有

$$X_2(t) = X_{20} + kX_1t. \tag{4.2}$$

从方程 (4.1) 和 (4.2) 消去时间 t，就得到

$$X_2 = X_{20} - \frac{X_{10}}{\bar{Y}} X_1 + \frac{1}{\bar{Y}} X_1^2. \tag{4.3}$$

(4.3) 式就给出了坐标 X_1 和 X_2 间的函数关系. 在此情况下，这一关系是抛物线关系. 从 (4.3) 可以看到，相轨迹的形状依赖于表示系统初态的点的坐标 (X_{10} 和 X_{20})，以及输入 $\bar{Y}$ 的值. 用方程 (4.3)，可以作出图 4.6 所示情况的相图，并验证这些曲线与方程 (4.3) 的对应性，建议读者做一下.

4.4. 稳定性

稳定性是关于系统行为的最重要的特性之一，它也是物理学、生物学、工程技术、经济学和控制论中的一个基本概念. 稳定性概念被用来描写系统的任何一个行为的特征的恒定性；“恒定性”一词是在最广泛的可能意义上使用的. 这个概念可以用于系统状态的恒定性 (它对时间过程的不变性)，或用于系统运动时其中某一状态序列的恒定性，甚至可以用于世界上活着的某种人的人数的恒定性.

“稳定性”有一个适用于动态系统平衡状态的严格而精确的定义，这个定义是杰出的苏联科学家 A. 李雅普诺夫(Ляпунов)给出的。假设我们用相空间中的一个不动点 a 来表示系统的一个平衡状态(图 4.8)。如果对于平衡状态的任何给定的容许偏离域(域 ε)，可以指出这样一个域 δ(它包括平衡

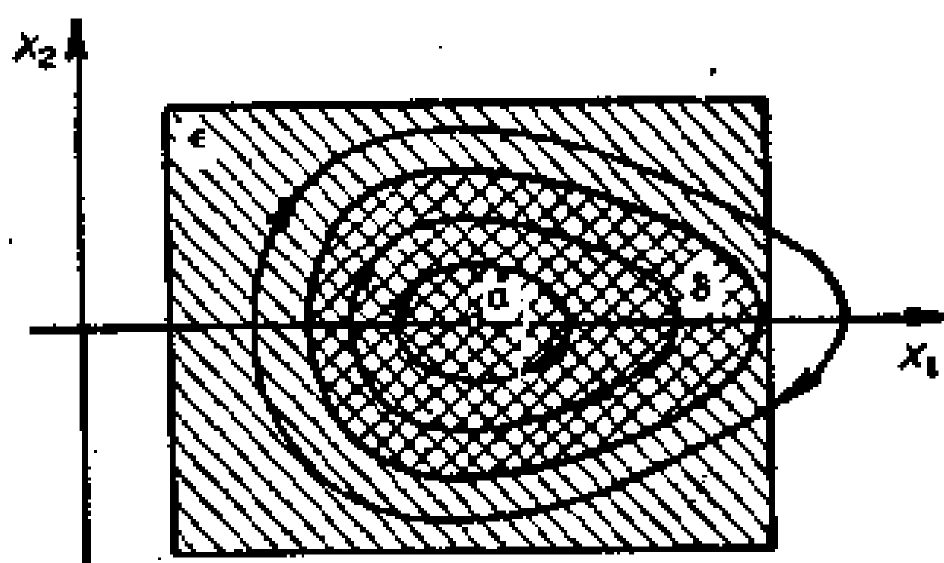


图 4.8. 解说李雅普诺夫稳定性定义的图

状态)，使得从区域 δ 中出发的任何运动轨迹决不会到达域 ε 的边界，那么这一平衡状态就是按李雅普诺夫稳定的。

图 4.8 所示的相轨迹的形状，确保这一条件是满足的，它证实了点 a 所表示的平衡的稳定性。

容易看出，在这一意义上，由图 4.3 中坐标原点所表示的平衡状态也是稳定的，即使相轨迹并不缩到这一点。

一个系统的平衡位置并不总是稳定的。例如，我们来看一个输入值为零位移 ($Y = \bar{Y} = 0$) 时液压拖动装置的工作体制，如图 4.9 所示。X_1 轴上的任何点都表示系统的平衡状态。对于处在中心位置的阀 S_1 和 S_2 来说，活塞速度等于零，系统的状态就不再改变。实际上如果假设条件 $Y = 0$ 与 $X_2 = 0$ 理想地得到遵守的话，系统状态是不会改变的。

但是实际上任何系统都受到内外扰动力的影响。不管这种力怎样小，它们总将引起系统状态的波动，结果代表点将在某一区域 β 中围绕它的平均位置徘徊。

这个代表点不可避免要走到 X_1 轴上面或下面，所以如图 4.9 所示，这个代表点的轨迹迟早将穿越域 ε 的边界，而不管域 δ 的边界如何选法。所以这个系统没有一个平衡状态是稳定的。

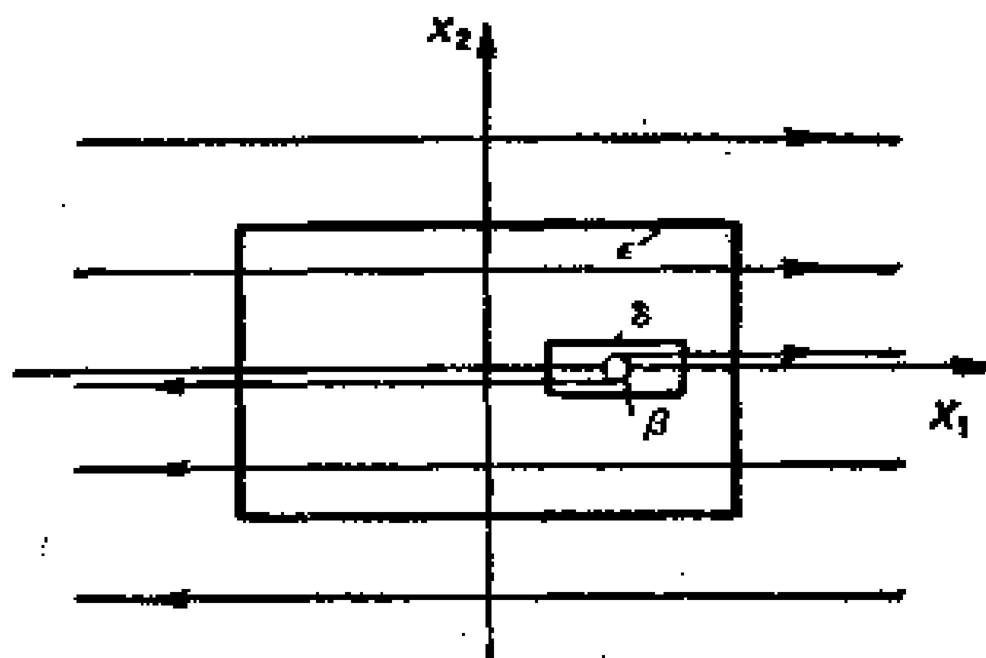


图 4.9. 动态系统的不稳定平衡

现在我们要考察一个确定市场价格的系统的例子，在这里有着稳定的和不稳定的平衡状态。我们假设，某种商品的需求 D 与供应 S 对市价 P 的依赖关系如图 4.10 所示，而价格变化则直接与供求差成比例：

$$\dot{P} = k(D - S), \tag{4.4}$$

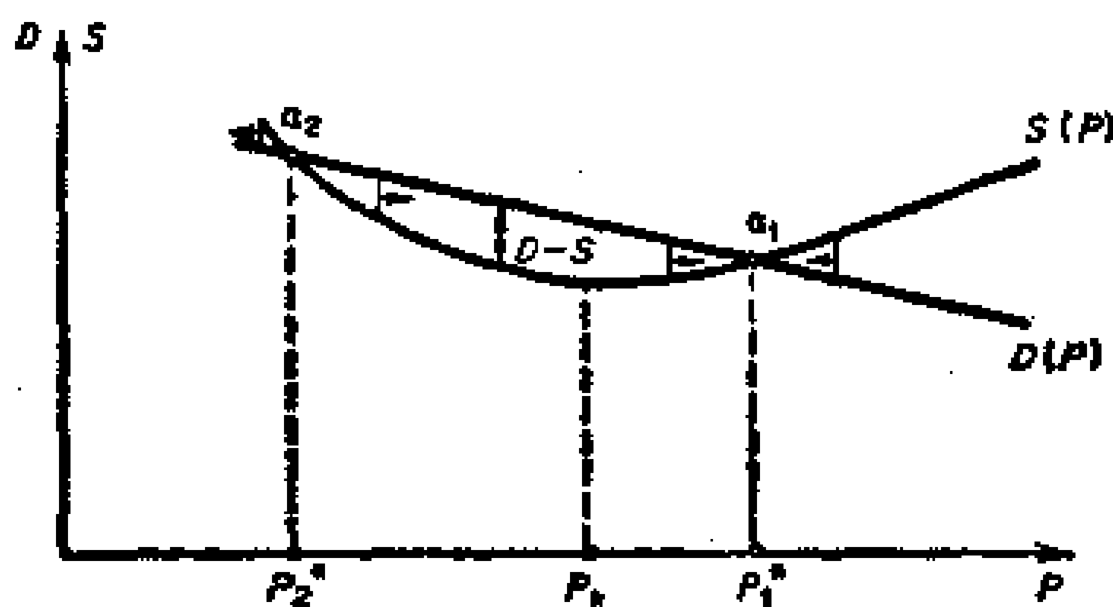


图 4.10. 需求 D 与供应 S 对产品价格 P 的依赖关系

这里系数 k 表示，当需求与供应之差为单位值时，每单位时间所增长的商品价格。根据这个模型的意义，系数 $k > 0$。

涨价会造成需求降低和供应增加，这个道理是很清楚的．在某些特殊场合，虽然价格下降到 P_K 以下，也可能出现供应增加的情况，例如，当价格降低而需求增加时，人们转而大量生产这种货物，就是这样．从图 4.10 中可以看出，这个系统有两个平衡状态 a_1 和 a_2，因为在这两个点处需求等于供应，按方程 (4.4)，价格就保持不变 ($d = 0$)．

为了阐明这两个平衡状态的稳定性，我们首先必须明确，在对平衡值 P_1^* 和 P_2^* 发生一个微小的随机偏差之后，价格会出现什么样的变化．从图 4.10 可以看出，对于点 a_1 来说，价格 P 与值 P_1^* 之间的差对应于差 $D-S$，它引起价格发生变化，从而恢复到被扰动的平衡，这样一来点 a_1 就表示系统的一个稳定平衡状态．但是，对于点 a_2 来说，从值 P_2^* 发生的任何价格偏差，都将引起价格向同一方向的进一步变化，因此系统在这个点处的状态是不稳定的．

4.5. [illegible]

“稳定性”概念，不仅被用来估计一个系统的平衡状态属于什么类型，而且在估计该系统的运动属于什么类型方面，也有很大的重要性．例如，阐明循环运动（即在状态空间里沿任何封闭轨迹的运动）的稳定性问题是非常重要的，这特别适用于周期运动．

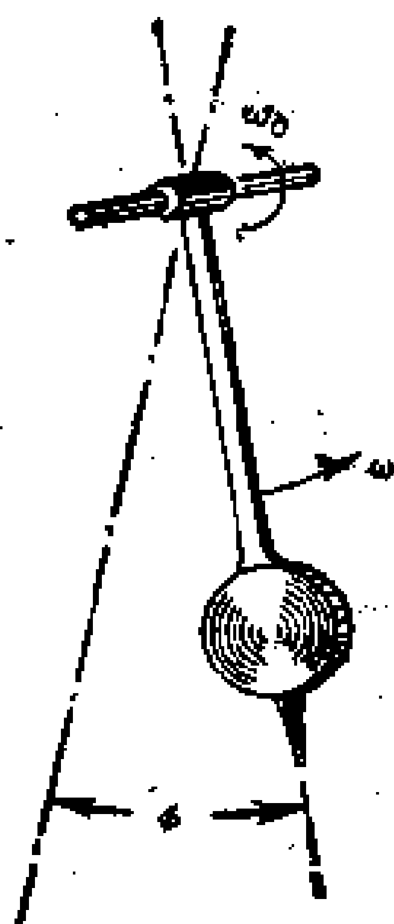


图 4.11．有摩擦的摆

作为例子，让我们考察一个有摩擦的摆，如图 4.11 所示，它与普通摆的区别在于，它的悬挂轴是以等角速 ω_0 转动的．当摆摆动时，摆的套管的角速度 ω 将周期性地变化，所以在某些时刻，ω 的方向将与轴的转动角速度 ω_0 相同．在套管运动滞

后于轴运动（$\omega < \omega_0$）的时间间隔 τ_1 内，轴与套管间的摩擦力将使摆加速，而在一周期的其余部分 τ_2 期间，摩擦力将使摆减速。

在时间间隔 τ_1 内，摩擦力所做的功将增加摆上所储存的能量，在一个摆动周期内，所增加的量为 ΔE_1，在时间间隔 τ_2 内，摩擦力所做的功就使储能减少 ΔE_2。计算表明，增加的能量 ΔE_1 和减少的能量 ΔE_2 对摆的振幅 A 的依赖关系如图 4.12 所示。在摆上的能量积累近似地与振幅成正比，而能量的消耗则与振幅的平方成正比。

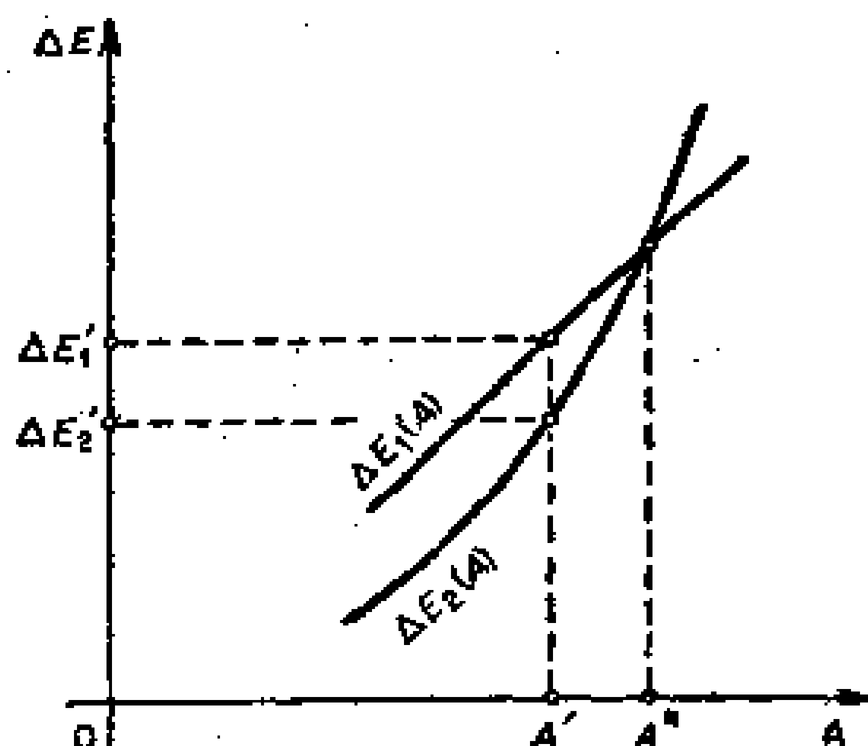


图 4.12. 摆的能量变化对摆动振幅 A 的依赖关系

显然，摆上所储存的能量，因之还有摆动的振幅，仅当在能量的增加和消耗之间保持平衡（即 $\Delta E_1' = \Delta E_2'$）时才保持不变。正如在图 4.12 中可以看出的那样，对振幅 A^* 来说，就可能出现这种平衡体制。摆的振幅为 A^* 的摆动，在图 4.13 中表示为 ϕ，ω 平面上的封闭曲线 1，这里 ϕ 是摆对竖直轴的偏角。

现在我们要阐明下列问题，在轨迹 1 上发生随机偏离以后，沿这条轨迹的运动是否会复原呢？让我们假设，由于某种原因摆上所贮存的能量减少了，代表点落到了轨迹 1 所划出

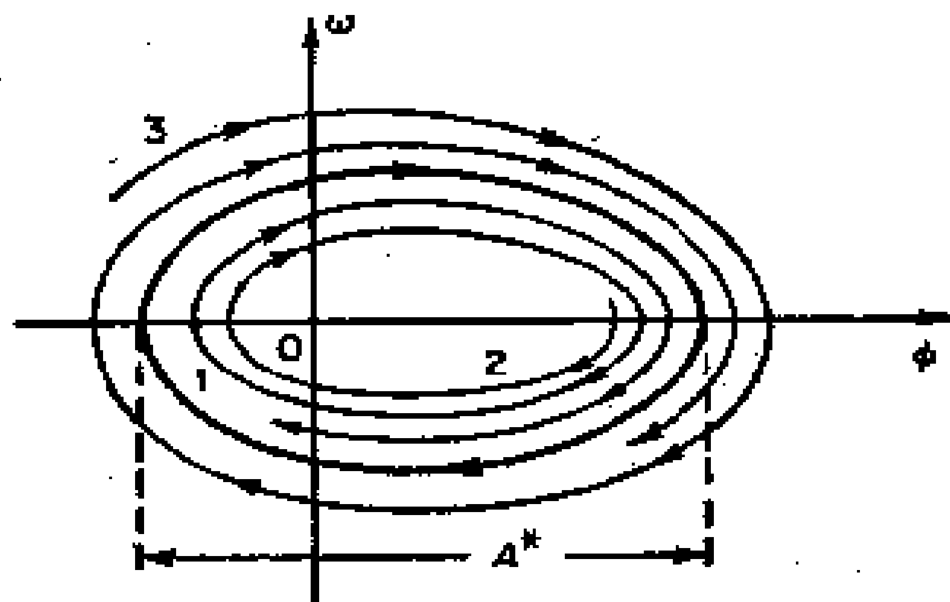


图 4.13. 有摩擦的摆的相图

区域内部。那么我们从图 4.12 发现 $\Delta E_1' > \Delta E_2'$，而在每次摆动期间贮存的能量都会增加，结果引起振幅的增加。这时代表点将沿轨迹 2 运动，随着时间的推移而趋向原来的轨迹 1。当最初贮存的能量超出了平衡值时，我们作类似的考察，可以看出运动将沿轨迹 3 发生，它也会趋向轨迹 1。

这一考察使我们能作出结论，轨迹 1 表示了系统的稳定振荡，不管系统的初始状态怎样，最终总将建立起这一运动状态。振荡的频率与振幅并不依赖于初始条件。这种振荡叫做自激振荡。自激振荡与受迫振荡间的区别是，对于前者来说激起振荡的外力是非周期的，而对于后者来说外力则是周期的。

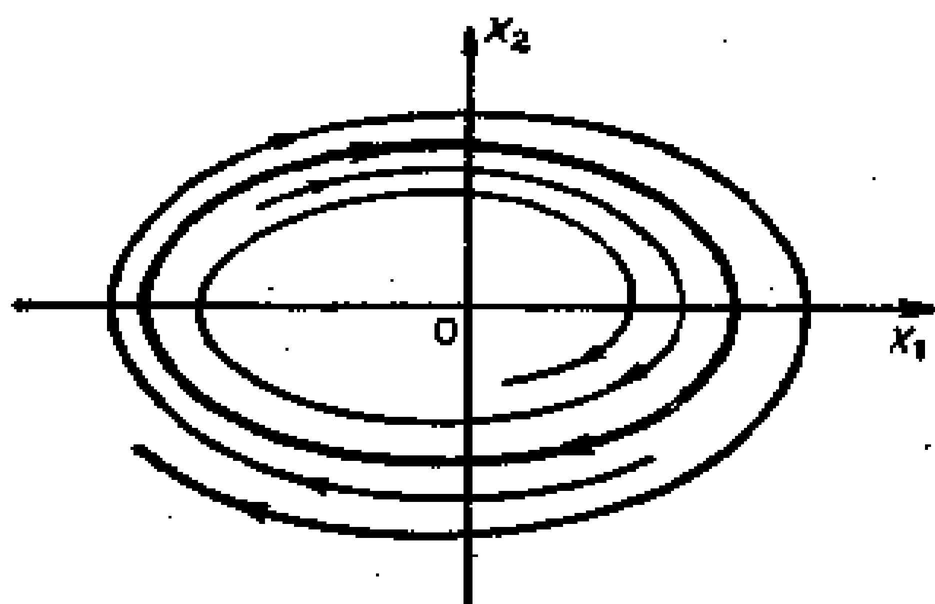


图 4.14. 不稳定的极限圈

例如，在这个例子中，轴是以不变的速度旋转的，振荡频率只是间接地与这一速度有关。

在相空间中表示稳定振荡的轨迹叫做稳定极限圈。

封闭轨迹并不永远表示稳定极限圈。例如，图 4.14 所示

的极限圈就是不稳定的。

让我们来看另一个循环运动的例子——在十字路口控制交通的简单系统。我们把有没有车辆在等待允许通行记为 X_1，有时，就记为 $X_1=1$；没有时，就记为 $X_1=0$。我们用 X_2 来表示是否允许通行（开绿灯），允许通过时 $X_2=1$，不允许通过时则 $X_2=0$。

这种系统的状态将取决于 X_1，X_2 平面上代表点的位置，它只能占有图 4.15 所示的四种位置之一。这个系统可以这样作出：从任何第 i 个状态（用坐标值 X_{1i}，X_{2i} 来表示）到第 $(i+1)$ 个状态 $(X_{1(i+1)}, X_{2(i+1)})$ 的转移，是通过在运算对象 X_{1i}，X_{2i} 上施加算子 P 而实现的：

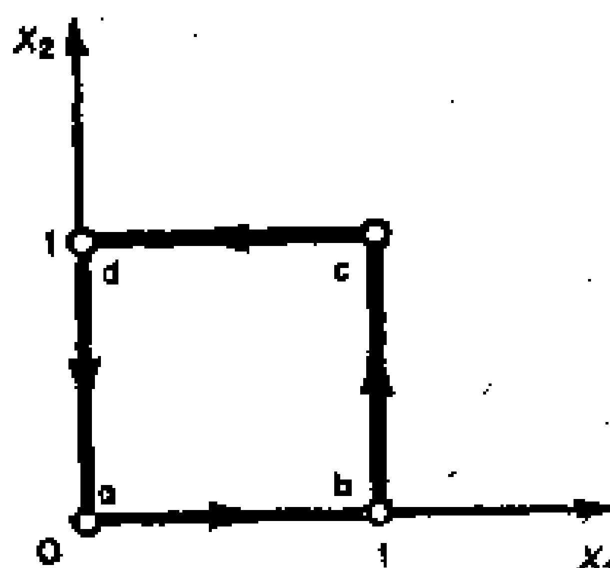


图 4.15. 道路交通控制系统的转移图

$$\{X_{1(i+1)}, X_{2(i+1)}\} = \{P\}\{X_{1i}, X_{2i}\},$$

这里算子 P 实现下列转移表（表 4.1）。

表 4.1

X_{1i}	0	1	1	0
X_{2i}	0	0	1	1
$X_{1(i+1)}$	1	1	0	0
$X_{2(i+1)}$	0	1	1	0

容易看出，这个系统将相继变到所有四种可能状态，完成 a-b-c-d-a 的循环，而它的代表点的轨迹将是一个正方形，如图 4.15 所示。

练习

1. 图 4.16 是一电子管振荡器的简化图，这个振荡器带有一个电感反馈和一个栅极回路振荡电路。线圈 L 和 L_{cb} 的匝数比确定互感系数 M，因而也确定了这个振荡器的工作体制，让我们假设 M 是这样选定的，它使得 LC 电路中产生不衰减

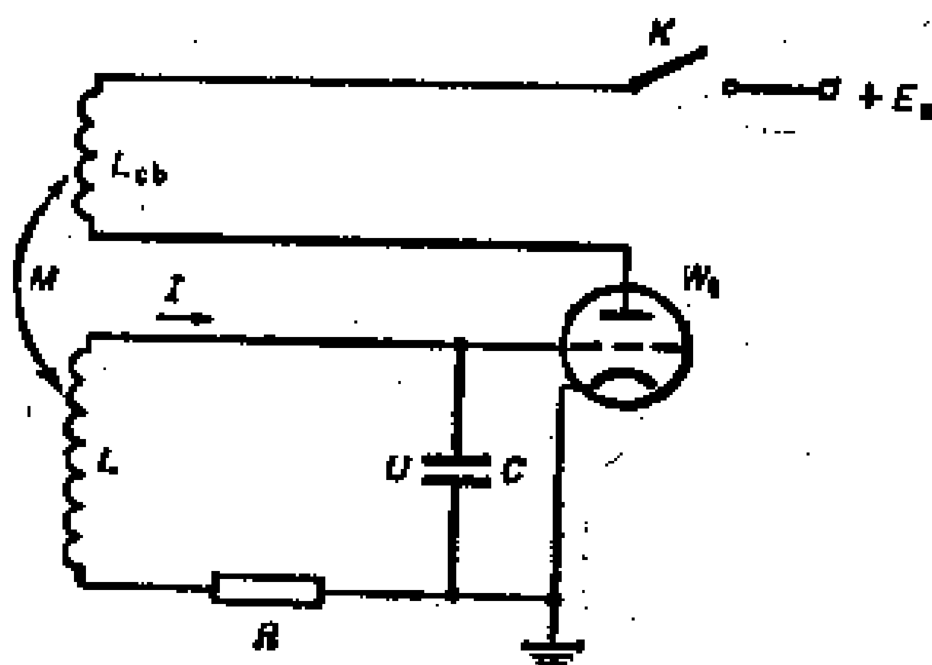


图 4.16. （第1题）

振荡. 把键K开断和闭合后，在这个动态系统中可能观察到什么体制?

解：(a) 平衡的——键K开断时.

(b) 过渡的——键K闭合时.

(c) 周期的——从过渡过程终止以后的一定时刻起.

2. 在图 4.16 中，电容器C的电压振荡的振幅U对互感系数的依赖关系，可以用图 4.17 中所示的那条曲线来描写. 试对图 4.17 中标以字母 a, b, c, d 的M值，在 U, I 平面上画出相图，条件是：在接通振荡器的瞬时，这个电路中出现电流跃变.

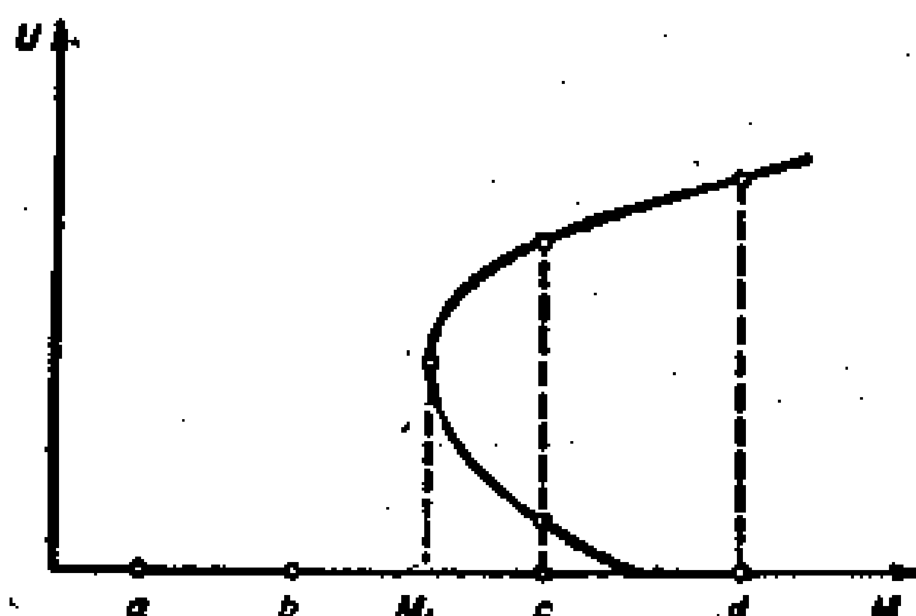


图 4.17. （第2题）

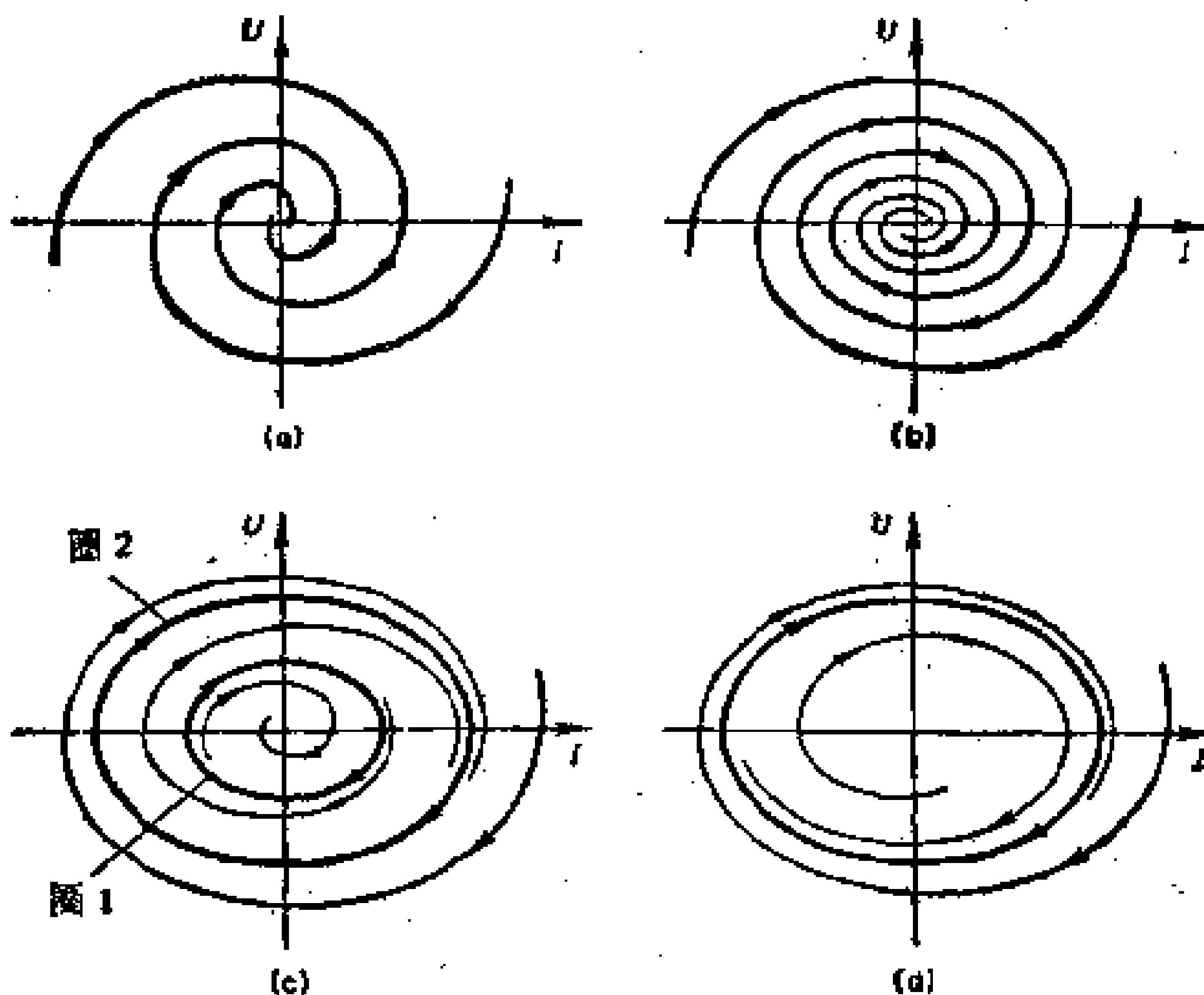


图 4.18. （第 2 题）

解：相图如图 4.18 所示。

3. 从例 2 里对点 c 所画的相图中，确定哪一个圈是稳定极限圈，哪一个圈是不稳定的。

解：圈 1 是不稳定的，圈 2 是稳定的。

4. 如果系统有一个稳定平衡点和一个稳定极限圈，那么总是存在一个不稳定圈吗？ 如果存在的话，应当如何在相图上定出它的位置？

解：是的，总是存在。在相图上，它的位置应当在稳定点和稳定极限圈之间。

5. 画出心脏工作的相图，把左、右心室的充盈率选作坐标。

解：这个相图与图 4.18(d) 所示的相类似，它表示一个稳定圈。

6. 在圈上可能出现一个平衡体制吗?

解：不。

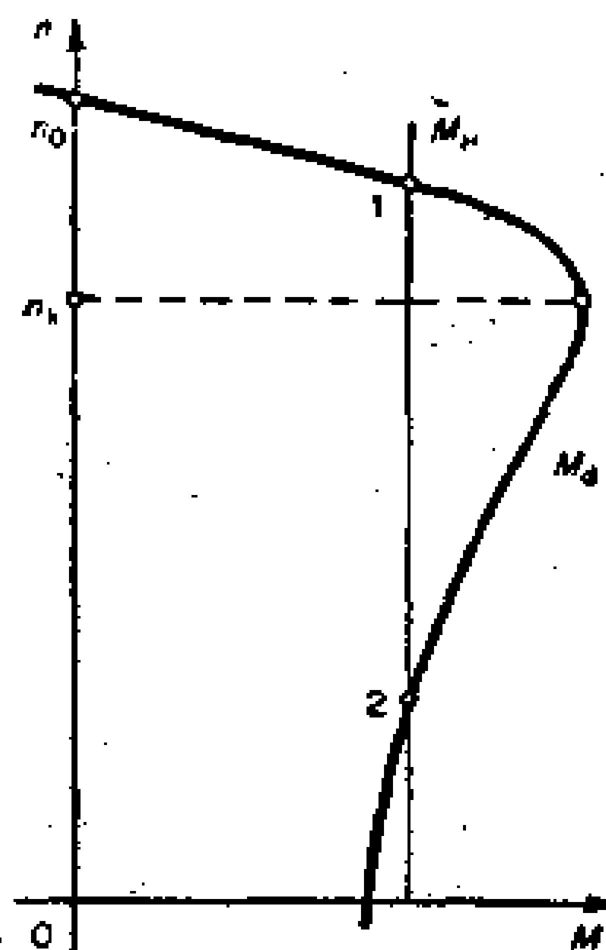


图 4.19. （第 7 题）

7. 找出一台感应电动机的稳定平衡点和不稳平衡点. 这台电动机的特性曲线如图 3.7 所示，设负载力矩与电动机的转速无关。

解：在图 4.19 中，稳定平衡对应于 n_0 与 n_k 间的转速，不稳定平衡对应于 n_k 与 O 间的转速. 点 1 对应于电动机的稳定工作条件，点 2 对应于电动机的不稳定工作条件.

8. 在阴极射线示波器上对某些周期过程进行了研究. 与这些过程的坐标 X 成正比的电压 $V_x = \sin \omega t$ 被馈送到水平偏转板，与坐标 Y 成正比的电压 $V_y = \sin 2\omega t$ 被馈送到竖直偏转板. 在示波器上电子束的轨迹将是怎样的?

解：轨迹如图 4.20 所示。

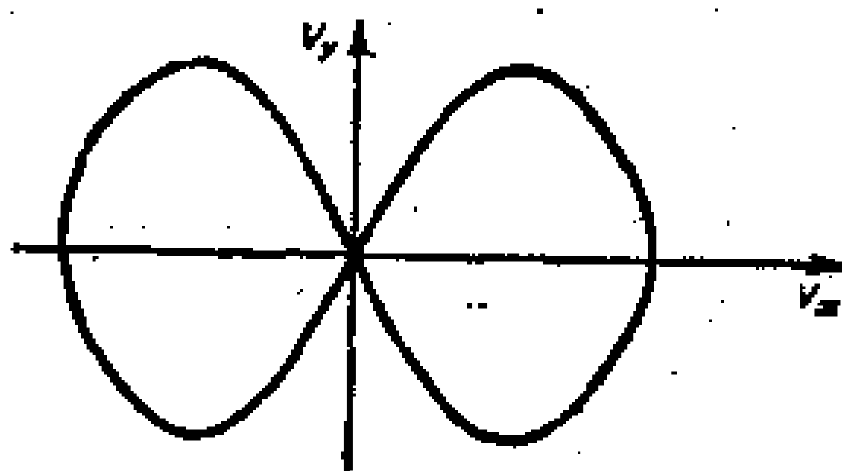


图 4.20. （第 8 题）

9. 制订城市公共汽车的时间表时，通常要使得公共汽车有规律地行驶. 但是，由于在某一停车站上乘客拥挤，一辆公共汽车可能误点，而下一辆公共汽车将紧跟在后头，所载乘客就比通常为少. 这样所造成的不均匀运行是稳定的还是不稳定的?

解：不幸，这种不均匀性是稳定的，它是不断引起乘客的抱怨、又使得交通调度者头痛的根源。

第五章　信　　号

在任何系统的各元素之间，和在作为整体的各系统之间，都存在着联结，通过这些联结，它们互相作用着．这些相互联结，可能是互相作用着的对象间的能量交换或物质交换．但是，也可能存在这种联结，在其中主导的因素是相互联结的信息内容，即把关于一个对象的状态的信息传送到另一个对象上去．信息的物质形式是次要的．这种信息链是借助于在控制论系统中循环的信号而实现的．

信号可以送过一段距离，结果就可以在分散于空间中的各对象之间，建立起联结．信号的贮存允许信号的复制与滞后传输，因此就可以把在时间上分离开来的各对象联结起来．

5.1．编码

我们至今所考察的系统，它的状态空间可以是离散的，也可以是连续的．在离散的状态空间中，我们假设只能用离散的点来表示状态的存在，而在连续空间中，状态的存在则可表示为状态空间某一允许范围里的任何点．

如果要观察一个系统的状态，就必须有个办法来估计它的坐标的值．看来没有一种观察方法，可以向观察者提供系统坐标值的绝对精确的数据．虽然靠眼的观察和任何测量的方法都具有一定分辨能力．

例如，如果我们用一把直尺来测量两根棒的长度，这两根棒的长度之差小于直尺一个刻度的宽度，那么我们量这两根

棒时将得到相等的长度．误差、噪声和被测值的起伏，都限制了测量的精度．就是说，如果两次测量是没有区别的，但它们不必是一模一样的，那么通常可以说这两次观察是近似地相同的．

所以，即使在数学上是当作连续系统来描写的系统，在某种具体处理过程中，对观察者来说，它也象是个具有有限个可能状态的离散系统．

我们将考察一个系统的**状态集**，它包含所有可区别的状态．例如，设我们对人的状态感兴趣，这种状态就是他的体温．如果我们排除人工冬眠的情况，那么可以假设，活人的体温将保持在34℃到42℃的范围内．显然温度可取这个区间内的任何值．但是实际上我们是用一只普通的医用温度计来量体温的，它的分辨度是0.1℃．所以在这一情况中，状态集将共由81个元素组成（元素是某一温度值），即(1)34.0℃；(2)34.1℃；(3)34.2℃；…(81)42.0℃．如果把系统的状态表示为一个矢量，它的分量可以彼此独立地取：$X_1=r_1$个值，$X_2=r_2$个值，…$X_n=r_n$个值，那么属于这个系统的状态集的元素个数（即值X_1，…，X_n的一切可能集合的个数）将等于

$$N=r_1r_2\cdots r_n.$$

我们将把系统在给定时刻的状态，叫做一个**事件**．如果在任何时刻t，系统可以处于集X中的任何状态，那么(X, t)就表示对每一时刻的可能事件集合．

系统的每个状态，可以用任何物理量的一个相应确定值或一列值来描写．借助于这个量，可以把消息（关于事件的信息）从一个对象传输到另一个对象．

如果一个物理过程是一个消息的物质体现，那么这个过程就叫做**信号**．其中发生信号传输的系统或介质叫做**信道**．

因为系统X的每个状态都对应于某一个消息X_c，所以可能事件的集合，就对应于用信号来传输的消息集。例如，关于某一地点的大气状态的信息，是用一系列电信号由无线电或电报传输到气象台的。

一个消息的形成，可以看作是将系统由状态 $X=(X_1, X_2, \cdots, X_n)$ 到X_c——可能的消息集之一，$X_c=(X_c^1, X_c^2, \cdots, X_c^n)$——的一个变换，它是由某一算子$P$产生的：

$$X_c^i=(P)(X_i).$$

把任何运算对象变到它的变换象（消息）的算子P叫做码，而这种变换运算叫做编码。不仅可以把系统的状态X或事件(X, t)看作这种变换的运算对象，也可以把消息X_c^i看作这种变换的运算对象。当为了方便或保密起见，必须把用一种方法编码的消息X_{c1}^i变换为用另一种方法编码的消息X_{c2}^i时，消息的输码确实是必要的。这种消息变换可以表示为按下列模式

$$X_{c1}^i=P_1X_i, \quad X_{c2}^i=P_2X_{c1}^i, \quad \cdots X_{cl}^i=P_lX_{c(l-1)}^i$$

相继地把算子$P_1, P_2, \cdots, P_l$用于X的形式。

为了重新确定所传输的消息，即使已经传输过了几次，也不必重新确定所有中间码。只要对消息X_{cl}^i进行一次变换

$$X_i=P^{-1}X_{cl}^i,$$

就够了，这里

$$P^{-1}=P_1^{-1}P_2^{-1}\cdots P_l^{-1}.$$

“-1”这个记号表示这样的变换的算子，它是一个没有这种记号的算子P所实现的变换的逆变换。例如，算子P_k和P_k^{-1}的相互关系如下：

$$P_k^{-1}P_kX_i=X_i$$

图象的电视传输给出了一个例子来说明复杂的传输系统，以及它的编码和解码。在这里出现下面的一系列变换：系

统的状态(即所传输的图象的亮度分布)——光电摄象管荧光屏上的光学象——电信号，其形式是由扫描荧光屏的电子束在电路中形成的变化着的电流——无线电信号，其形式是由发射机发射出的变频电磁波——作为电视机接收的消息的逆变换(解码)的结果，而在接收机显象管上产生的图象. 这些就是整个过程的各个阶段.

5.2. 信息

从上面所说的可以看到，一个信号可以包含关于系统状态、事件或过程的某些信息，但我们仍不清楚，是否能定量地测量信号中所含资料，或计算这个信号所携带的信息量. 这样的测度对于计算传输信号的通道的容量乃是必需的. 为了确定变换信号之类的装置的特性，以及确定合适的编码方法，这种量度也可能是必需的.

信息加工的定量测量问题，迄今还没有完全解决，但是对于和信息从一对象到另一对象的传输、信息的编码、记录和贮存有关的相当广泛的一类问题来说，已经完成了定量的理论，这主要是美国科学家 C. E. 香农得到的. 如果我们暂时不考虑信息的语义方面、信息对接收者的价值和信息得以保存的形式，那么任何消息都可以看作是关于某一事件 X_i, t_i 的信息，它包含着关于系统 S 在时刻 t_i 处于哪一些可能状态的数据.

让我们更详细地考察所谓离散消息. 离散消息是从某一符号集——字母表——中取出的符号序列. 每个符号叫做这张字母表的字母. 离散消息的一个例子是任何语言(例如俄语)中的普通教科书. 注意，这种消息的字母表要大于俄文字母表本身：除了字母以外，它还含有词与词之间的空白(一个非常重要的符号！)和标点符号. 从某一张字母表中取出的有

限符号序列，叫做这张字母表中的一个词。

使用离散消息，使我们有可能用从字母表中取出少数不同符号的方法（这些符号的个数叫做码基），传输关于从任意多可能状态中选出的某些状态的资料。例如，任何消息不管多么复杂，都可以只用两个不同符号（例如 0 与 1）的序列来传输，这两个符号可以分别地对应于：0——没有信号，1——有信号。如果系统可以处于 N 个不同状态 X_i 之一，状态 X_1，X_2，$\cdots$，X_N 的集合又为消息接收者所知，那么为了传输关于该系统状态的信息，只要指出系统所处状态的号码 i（$i=1$，2，$\cdots$，N）就够了。这个号码就是字母表中的一个词，而字母就是数字。

构成数的各个数字的数量依赖于所用的码。在二进制系统中每个数都是用 0 和 1 的组合来表达的，0 和 1 就构成这个数的数字。任何数 i 都可以写成下列形式：

$$a_m a_{m-1} \cdots a_1, \tag{5.1}$$

这里可以假定每个 a 都只取两个值 0 或 1，且 (5.1) 式表示

$$i = a_m 2^{m-1} + a_{m-1} 2^{m-2} + \cdots + a_1.$$

例如，如果数 i 写成十进制形式是

$$i = 27,$$

那么写成二进制形式就是

$$i = 11011$$

$$(1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2 + 1). \tag{5.2}$$

词 (5.2) 可以用由电流脉冲和间歇组成的一个信号序列来传输，这一序列如图 5.1 所示。

所以，关于任何事件的消息，都可以用只有两个字母的字母表，写成一个词。容易看出，长为 m 的所有二元序列的个数，等于 2^m，因为可以假设每个符号都可独立地取两个值。所以，使用长为 m 的二元序列，就可以传输关于一个事件的消

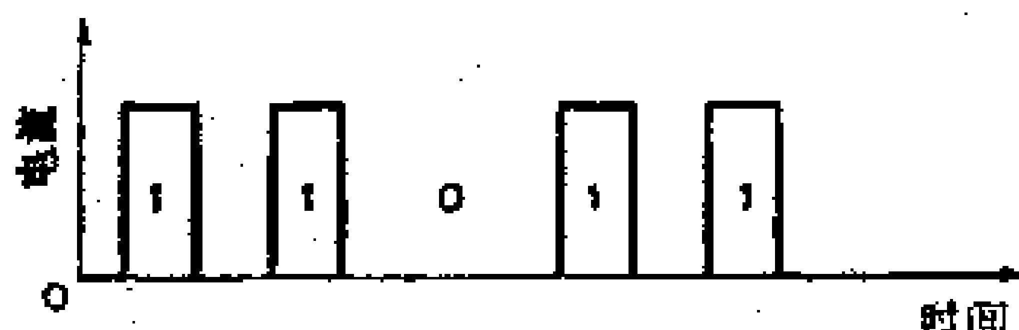


图 5.1．相当于二进制消息 11011 的信号(电流脉冲序列)

息，这个事件是从 N 个可能事件中选出的。这里 $N=2^m$，也可以写为 $m=\log_2 N$。如果这个消息不是用二进制码来传输的，而是用十进制码来传输的（即用十个不同符号而不用两个），我们就需要一个长度为 $m'=\log_{10} N$ 的序列。这时 $m'=m\log_{10}2$，即 m' 与 m 的区别将在于一个不依赖于 N 的常数因子。

一般说来，不管我们用怎样的码基，为传输某一消息所需的序列长度，总是与可能事件数的对数成正比的。一个消息中所含的最大信息量 H_{max} 与消息的长度成正比，这样的假设是合理的，即

$$H_{max}\sim m\sim \log N.$$

在选择比例系数时，我们选择对数的底，这意味着为信息量选择一个单位。为此目的，最常用的是以 2 为底的对数。这时，我们取一个二进制数字中所包含的信息，即选择两个可能消息中的一个时所包含的信息，作为单位信息。这种单位信息叫做比特〔bit，来自 binary digit（二进制数字）一词〕。

我们得到

$$H_{max}=\log_2 N. \tag{5.3}$$

这一从消息中可以得到的最大信息量的测度，早在 1928 年美国科学家 L. 哈特利（Hartley）创立信息论之前就已提出了，所提议的这个测度有两个重要性质：它随着 N 的增加而单调增加，而且具有可加性。可加性的意义如下。设消息 a 是由 N_1 个可能消息中选出的，而消息 b 与此无关，是由 N_2 个

可能消息中选出的．那么由消息 a 与 b 组成的组合消息含有多少信息呢？显然，一切可能的消息数将等于 $N_1 \cdot N_2$．因此

$$H_{max}(N_1 \cdot N_2) = \log_2(N_1 \cdot N_2) = \log_2 N_1 + \log_2 N_2$$
$$= H_{max}(N_1) + H_{max}(N_2),$$

即两个独立消息中所含的信息量，等于每个消息中的信息量的和，这是符合于我们对信息的直观概念的．

H_{max} 的大小指出了在一个消息中可能包含的信息量的上界．实际上信息量不仅依赖于可能消息的总数，还依赖于这些消息的概率．例如有下面两个消息，一个消息说的是一个新生儿是男孩还是女孩，一个消息说的是你的朋友是不是生下了三胞胎，前者所含的信息量大大超过了后者．实际上生三胞胎的情况是很稀罕的，你几乎可以预言这必定不会发生．

必须强调，我们并不去讨论一个特殊论断（例如"生下了三胞胎"这一消息）中的实际信息量，而是讨论以给定概率从一批可能消息中选出的一个消息里所含的平均信息量．因为"生下了三胞胎"这个出乎意外的消息是很少碰到的，在绝大多数生孩子的场合，我们得到的都是"没有生三胞胎"这一意料之中的消息，所以平均信息量就很小．在极限情况下，当所有消息的概率除了一个以外都是零的时候，信息量就是零——这时预先就知道将得到什么消息，因此这个消息就不含有任何新东西；它不含信息．另一方面，当一切可能消息验前地（在得到消息以前）等概率时，信息量就必定达到最大．这个直观概念有助于我们去理解香农在 1947 年引进的信息的定量测度的意义．

现在我们假设进行了一项实验，它的结果是预先不知道的．只知道可能的结果的集合是 $x_1, x_2, \cdots, x_N$，而这些结

果的概率是 $p(x_1), p(x_2), \cdots, p(x_N)$[1]. 按香农,消息中的信息量(以比特为单位),它依赖于这样的实验结果,等于

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{i=N} p(x_i)\log_2 p(x_i). \tag{5.4}$$

如果所有实验结果都同样地可能，那么对于一切 x_i 来说，有 $p(x_i) = \frac{1}{N}$ 和

$$H = \log_2 N = \max.$$

如果对于某结果 x_k 来说 $p(x_k) = 1$，而对于其他结果来说 $p(x_i) = 0$ $(i \neq k)$，那么 $H = 0$（假定值 $0\log 0$ 等于零）. 在其他场合则成立下列不等式:

$$0 < H < \log_2 N.$$

值 H 叫做随机实验(随机变量) X 的熵. 熵是实验结果的初始不确定性的测度，是可能的实验结果的统计多样性的测度. 关于实验结果的消息完全"消除"了这一不确定性,因而产生了信息量 H.

在作理论研究时，通常使用自然对数而不用以 2 为底的对数,这样比较方便. 相应的信息单位叫做自然单位 [*natural unit*，简写为奈特 (nat) 或尼特(nit)]. 以自然单位表示的熵等于

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{i=N} p(x_i)\ln p(x_i). \tag{5.5}$$

(5.5) 式与统计物理学中的熵的表达式是一样的(如果我们把结果 $x_1, \cdots, x_N$ 解释为一个物理系统的各个状态的话). 这个一致性不仅是形式上的. 早在本世纪初，德国物理学家波尔茨曼 (Boltzman) 就写道:"熵是关于物理系统状态的信

1) 用概率论的术语,我们可以说 X 是个随机变量,它以 $p(x_1), \cdots, p(x_N)$ 的概率取值 $x_1, \cdots, x_N$.

息不定性的测度."现在已经在信息论与统计物理学之间建立了一个深刻的相互关系，这就使我们有可能把信息论发展成一门物理学理论了.

图 5.2 显示了有两个可能结果 x_1 与 x_2 的实验的熵的变化，这个熵是结果 x_1 的概率 p_1 的函数(这时结果 x_2 的概率显然是 $p_2 = 1 - p_1$).

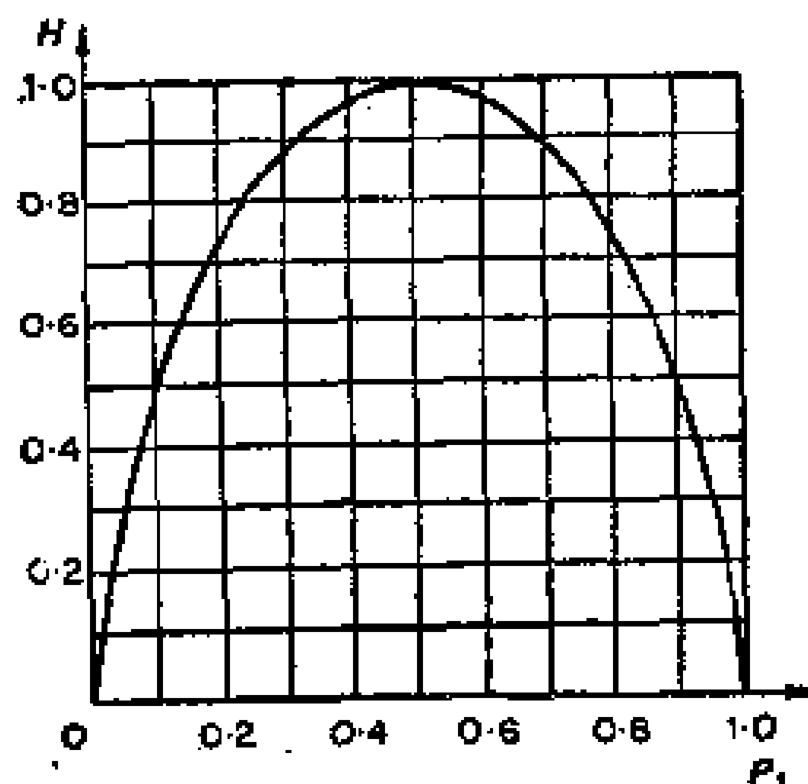


图 5.2. 有两个可能结果的实验的熵：p_1——结果之一的概率

5.3. 信号的传输

信号的传输总是通过某一信道实现的，这种信道有：电话线，无线电通道，空气，磁记忆通道等. 信道通常还包括编码、输码和解码装置. 一个信道可以看作是一个系统，对它馈入输入信号 Y 而得到输出信号 X，如图 5.3 所示. 象任何别的系统一样，一个信道将受到内部与外部干扰 M 的影响. 干扰源是随机的内部噪声和外部噪声，有时表现为组成通道的元件的故障. 在干扰的影响下，沿着通道传输的信号可能失真，甚至完全到不了接收端.

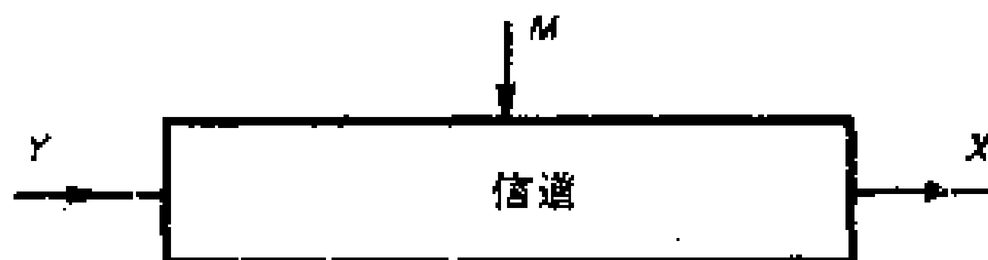


图 5.3. 信道

例如，假设在强烈大气干扰条件下，用无线电报来接收莫尔斯电码编成的消息. 那么有些信号脉冲(点与划)将被噪声

"淹没"，相反地噪声脉冲可能被错认为信号．所以，如果噪声存在，则输出信号 X 就不是输入信号 Y 的一一对应函数，而仅以概率或统计的关系与之相联系．于是就发生了这样的问题，怎样从一个已知的随机变量（输出信号 X），来定量地测量关于另一个随机变量（输入信号 Y）所取值的信息内容？信息量的这个最一般化的测度，也是香农引进的．为了解释这一概念，我们必须先熟悉条件概率这一概念．

作为例子，让我们考察用两种不同质地 I 和 II 的原材料来生产元件的情况．设这些元件有 70% 是用材料 I 制造的，30% 是用材料 II 制造的．用材料 I 制成的每一百个元件中有 83 个合格，用材料 II 制成的每一百个元件中有 63 个合格．

一个随机选出的元件为合格品的事件称为 A，事件 A 的概率 p [表示为 $p(A)$]，就是整个生产中的合格元件的平均值，我们容易把它计算出来：

$$p(A)=\left(\frac{83}{100}\cdot\frac{70}{100}\right)+\left(\frac{63}{100}\cdot\frac{30}{100}\right)=0.77.$$

现在设已知一个元件是用原材料 I 制成的，那么这个元件为合格品的概率是 0.83．显然，加上一个条件（这里是加上关于原材料质地的信息）就改变了事件的概率．我们用 B 来表示 A 所依赖的条件，而把在条件 B 下事件 A 的概率——这一事件的条件概率——记为 $p(A/B)$；现在对本例就可以写出

$$p(A/B)=0.83.$$

一般地说，如果随机变量 Y 取值 $y_1, y_2, \cdots, y_N$，随机变量 X 取值 $x_1, x_2, \cdots, x_M$，那么条件概率 $p(y_i/x_j)$ 就是当已知 X 取值 x_j 时 Y 取值 y_i 的概率．无条件概率 $p(y_i)$ 等于对于 x 的一切可能值平均的条件概率：

$$p(y_l)=\sum_{i=1}^{M}p(x_i)p(y_l/x_i),\tag{5.6}$$

这里 $p(x_i)$ 是 X 取第 i 个值的概率。值 $p(x_i)\,p(y_l/x_i)$ 是 X 取值 x_i 而 Y 取值 y_l 的概率。这叫做事件 (x_i, y_l) 的**联合概率**，记为 $p(x_i, y_l)$。

现在我们试着算一算在信道的接收端，收到多少关于已发出的信号的信息。信号 Y 的初始(验前)不确定性等于它的熵 $H(Y)$

$$H(Y)=-\sum_{l=1}^{N}p(y_l)\log_2 p(y_l).$$

如果收到的信号 X 明确地与送出的信号有关，则在收到这个信号后不确定性就消失，我们就得到一个等于 $H(Y)$ 的信息量。但是实际上，在收到一个信号譬如 x_i 以后，真正已发出的信号 Y 的不确定性变成了

$$H(Y/x_i)=-\sum_{l=1}^{N}p(y_l/x_i)\log_2 p(y_l/x_i),$$

因为这时只有 Y 的各种值的条件概率 $p(y_l/x_i)$ 才是已知的。

收到的信号 X 能以概率 $p(x_1), \cdots, p(x_M)$ 取任何值 $x_1, \cdots, x_M$，因此如果收到的信号是已知的，所传输信号的平均不确定性就等于

$$H(Y/X)=-\sum_{i=1}^{M}\sum_{l=1}^{N}p(x_i)p(y_l/x_i)\log_2 p(y_l/x_i).$$

这是已知随机变量 X 时随机变量 Y 的**条件熵**。条件熵总是小于、至少不大于无条件熵：

$$H(Y/X)\leqslant H(Y).$$

等式仅当 X 的知识不改变 Y 值的概率时才成立，即当不管 x_i 取什么值，总有 $p(y_l/x_i)=p(y_l)$ 时才成立[1]。

---

1) 这时随机变量 X 和 Y 叫做**独立变量**。

用下面的值作为随机变量 X 中关于随机变量 Y 的信息量的测度是很自然的，这个值是：X 的值已知时 Y 的不确定性（平均来说）所减少的量，亦即：无条件熵与条件熵之差
$I(X, Y) = H(Y) - H(Y/X) =$

$$\sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N} p(x_j, y_i)\log_2 \frac{p(x_j, y_i)}{p(x_j)p(y_i)}. \tag{5.7}$$

在信息论中已经证明，这里引进的信息论的测度是非常有用的，特别是它使我们能完满地解答下述问题：信道应当是怎样的，才能使某个消息源产生的消息通过它，而不管这些消息的物理性质与涵义如何，不管它们是语言、音乐、图象、气象资料、生物体中的神经冲动、还是什么别的东西？

信息论的一个重要性质是它的唯一性与对称性：$I(X, X) = 0$ 和 $I(X, Y) = I(Y, X)$. 对称性的意思是：在收到的信号中所含的关于被传输信号的信息量，等于被传输信号中含有的关于所收到信号的信息量. 如果输入信号和输出信号无关，即它们不以任何方式相联系，哪怕是统计地相联系，则信息量为零. 如果收到的信号唯一地确定所传输的信号，即如果 $H(Y/X) = 0$（所传输信号对于一个已知接收信号来说的不确定性等于零）[1]，那么信息量达到最大——值 $H(Y)$.

一般情况下，信息量满足下列不等式

$$I(X, Y) \leqslant H(Y) \text{ 和 } I(X, Y) \leqslant H(X).$$

设通道的输出是一个信号 Y，它只可以取两个值 $y_0 = 0$ 和 $y_1 = 1$，相应的概率是 $p(y_0) = p(y_1) = 0.5$. 因此从图 5.2 可以看到，对于 y_0 或 y_1 都有 $H(Y) = 1$ 比特. 我们假设，把信号 $y_1 = 1$ 用于输入时在 90% 的情况中将出现输出信号

1）重要的是，对于 X 的每个已知值，应当有唯一确定的 Y 值与之对应. 但是 Y 的同一个值，可以对应若干个 X 值.

$x_1 = 1$，即条件概率 $p(y_1/x_1) = 0.9$，而对于输入信号 $y_0 = 0$ 来说，我们将在输出处得到信号 $x_0 = 0$ 的条件概率也等于 $p(y_0/x_0) = 0.9$。于是我们从图 5.2 中求出 $H(Y/X) = 0.5$，而在输出信号 x_0 或 x_1 中所含的信息量将不是 1 比特，它按照 5.7 式将减少到值

$$I = 1 - 0.5 = 0.5 \text{ 比特。}$$

上面对于消息中所含信息的定量测度而引进的概念和关系，在控制论中广泛地使用着。它们不仅被用来计算信道，还用来估计存储器的容量、找出控制论系统中信息加工的定量性质，以及在复杂系统中挑选信息网络的结构。

在以后几章里，我们还会遇到这样一些问题，在那里所传输的信息的量，是相当重要的。

5.4. 存储（记忆）

为了在时间上相分离的系统之间建立联系，信道必须具有“仓库”，以便把信息从消息发生的瞬时存储到可能需要这一消息的瞬时[1]。在生物系统中，从实际观察看来，这种存储信息的“仓库”显然是存在的。如果没有这种“仓库”，就不可能解释人类和动物有记忆，而这是无可否认的事实。在人造系统中，记忆的机制是一个最重要、最困难的通信问题和控制工程问题。

为了存储信息，显然必须把实际的物理信号 x_c（它在一般情况下是随时间和空间而变化的，$X_c = X_c(x, y, z, t)$，这里 x, y, z 是空间坐标，t 是时间）转换为某个信号序列 $F_c = F_c(x, y, z)$，F_c 与时间无关（至多只和时间略微有关）。为了实现这样一个变换，显然必须有某种介质（信息载体），它的状

1）由于我们生活在其中的这个物理世界的性质，信息的传输在时间上只能单向实现，从过去到将来，而不能从将来到过去。

态可以借助于信号 X_c 而按所需方式变化。当激励停止以后，介质应在一段足够长的时间里，以序列 F_c 的形式保持它所达到的原始状态，而不发生可感觉到的变化。

如果信号序列 F_c 是信号 X_c 的一个同态模型，那么在 X_c 与它的序列 F_c 之间，可以有一个对应，使得对于时刻 t 的信号 X_c 中所含的每一个通信元素，都有序列（或称轨迹）F_c 的一个特定元素的某一状态与之一一对应。初始信号要从它的序列或轨迹中精确地复制出来是不可能的，这一点我们在第三章中讨论同态模型的性质时，已经解释过了（在原型和它的同态模型之间不存在一一对应）。

我们早先提到过，由于在任何信道中都存在内外干扰 M，使得在记忆与复制过程中也会损失信息。

如果被存储的信号 X_c 是个一维、二维或三维的函数：$X_c = X_c(t)$，$X_c = X_c(x, t)$ 或 $X_c = X_c(x, y, t)$，那么它可以相应地映射为载体状态的一维、二维或三维分布：

$$F_c = F_c(x), \quad F_c = F_c(x, y) \quad \text{或} \quad F_c = F_c(x, y, z).$$

信号的时间坐标，将对应于载体的一个空间坐标。例如，磁带录音是通过这样一个变换 P 而实现的，P 把信号 $X_c(t)$ 变换为沿着磁带长度 x 分布的磁感应强度 B 的函数：

$$B(x) = PX_c(t).$$

二维信号 $X_c(x, t)$ 或 $X_c(x, y)$ 可以表现在一个二维载体上，例如表现在一张照相底片上。

当必须记忆一个三维信号 $X_c = X(x, y, t)$ 时，设想人工记忆就要困难多了。理论上来说，这种信号可以借助于一个三维载体来存储，这个载体的一个空间坐标 z 将表示时间，而状态 F_c 的另外两个坐标 x 和 y，将表示适当时刻的原型中的状态分布。

当我们试图用一个三维载体来存储一个四维信号 $X_c =$

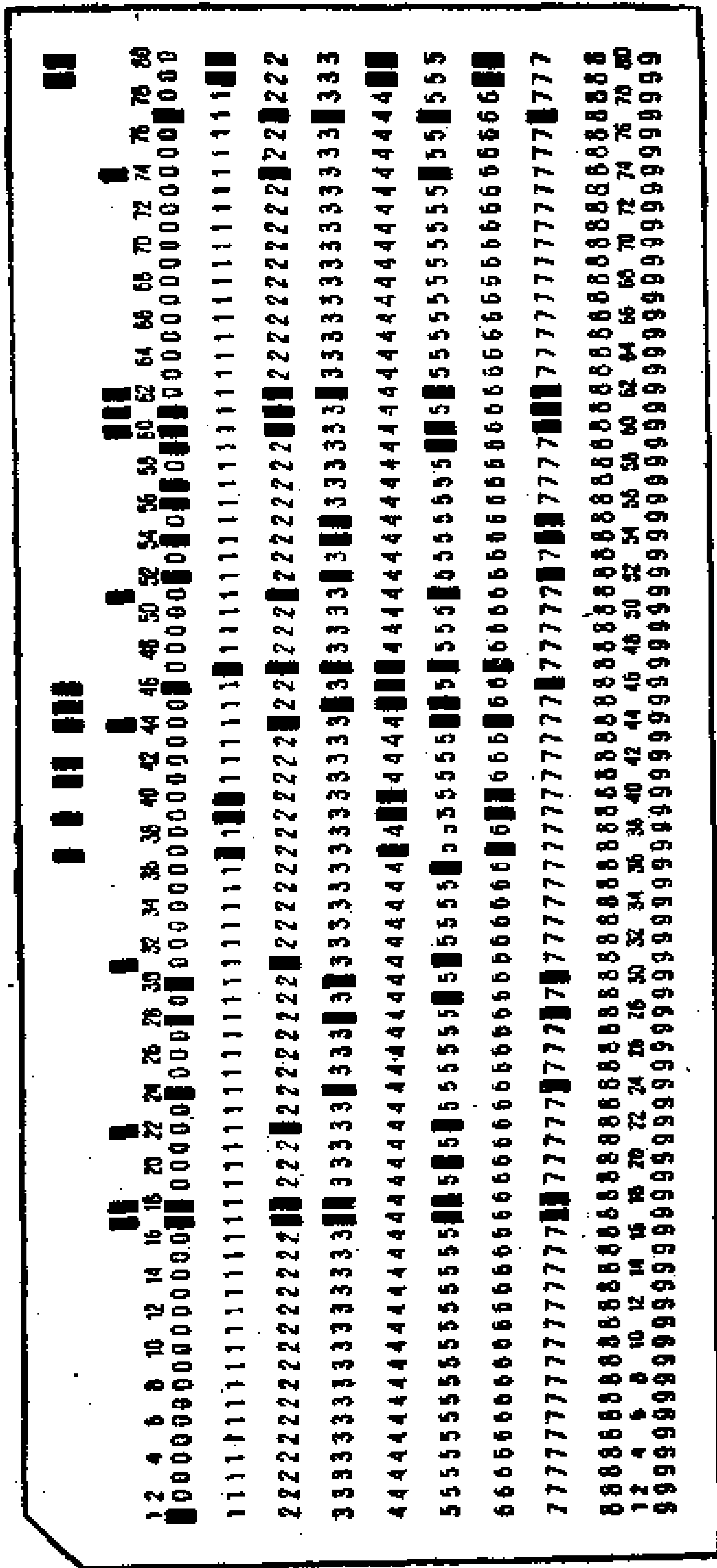
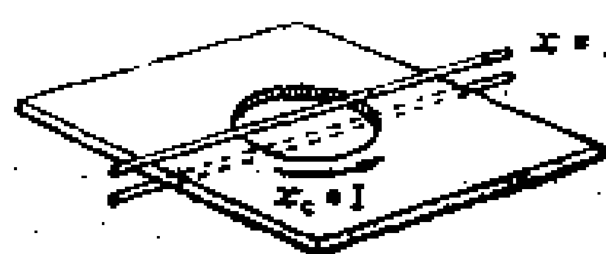


图5.4. 标准穿孔卡

非电记录信

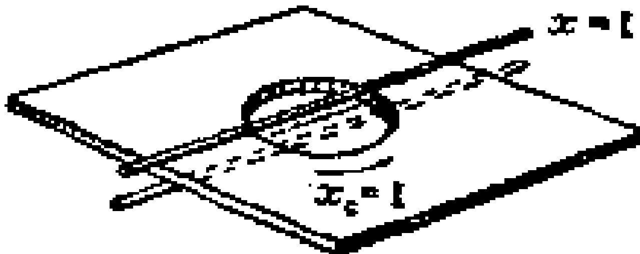
穿孔纸带	矩阵型
机电继电器存储器	电子管继电器存储器
可动磁载体存储器	
磁带式	磁鼓式
带静磁元件的存储器	
一孔或多孔	双轴式
低温型存储器	
冷子管存储器	冷持管存储器



5.1

号的存储器

光电式	唱片
	$x = 1$ $x_c = \theta$
带参变继电器和铁磁共振继电器	**带铁氧体元件**
$x = I$ $x_c = I$	$x_c = \phi_{ocm}$ $x = I$
磁盘存储器	**磁卡片**
$x_c = \phi_{ocm}$ $x = I$	$x = I$ $x_c = \phi_{ocm}$
磁纽线存储器	**薄膜存储器**
$x = I$ $x_c = \phi_{ocm}$	$x = I$ $x_c = \phi_{ocm}$
带圆电流元件的存储器	**雪崩复合低温开关式存储器**



示波管存储器	
带有一个栅垒	带有电荷的表面分布
带有延迟线的存储器	
水银式	磁致伸缩

$X(x, y, z, t)$，想象记忆的模拟机构时，主要的困难就出现了，因为这时信号序列应当有四维，而载体是个物质的东西，所以只能是三维的。众所周知，人是能够记忆随时间而改变的三维象的。这个现象可以用，例如，平行地记忆两个三维象这一假设来说明，由于两个三维象的体视效应，就给出了一幅整体的变化着的三维象的图景。存储容量和载体维数间的这种惊人的联系，是生命系统中记忆的许多奥秘之一，这个问题至今还没有为科学所解决。

在控制工程中所用的人工记忆中，常常使用这样的方法，它使我们能把复杂信号的存储问题，化为存储较简单的信号(通常是一维信号)的问题，办法是把原来的连续信号转换为离散信号。例如，在电视中用一维无线电信号来传输动画面，是以扫描这幅图象为基础的。

在自动化、计算机工程和通信中，广泛使用的离散信号

5.1

"Seliktron" 型	再生式
$x=u$　$x_c=u$ 表面	
集中参数元件	压电式
$x=u$　$x_c=f$	$x=u$　$x_c=0$

(由二元信号组成的序列)的存储或记忆，是通过离散地变化存储器的元素的状态而达到的，存储器有穿孔卡或穿孔带、磁鼓或磁盘、铁氧体磁心等．

图 5.4 给出了一张标准的穿孔卡，上面穿的孔表示编了码的二进制数字．

使用得最广泛的人工记忆装置的设计原理如表 5.1 所示．

练习

1. 集中在有七条支线的停车场上的火车，借绿灯信号通行到干线，每条支线都有自己的信号集合．原则上用由三个信号组成的序列就足够了，如果我们能对每条支线在三个时刻用开关绿灯来进行编码的话．对七条支线分别写出开关绿灯的组合法．在本例中运算对象、象和算子各是什么?

解：编码组合如图 5.5 所示．黑点就是绿灯信号．本例中运算对象是停在车场上的车辆，算子是绿灯信号码，象是已

经通行到干线的车辆.

2. $y = \log x$ 和 $y = \cos x$，这两个变换中，哪一个和 $x > 0$ 的编码有一一对应关系?

解：第一个. 对于第二个变换来说，x 有许多值都可以给出同一个 y 值.

1	○	○	●
2	○	●	○
3	○	●	●
4	●	○	○
5	●	○	●
6	●	●	○
7	●	●	●

图 5.5.（第 1 题）

3. 假设你的一个熟人生了个孩子，你问："生的是个男孩还是女孩"? 在答案中所含的信息量是多少?

解：$N = \log_2 2 = 1$ 比特.（我们把生男生女当作是等可能的）.

4. 一个消息是用五位的十进制数 c 的形式写出的（在任何一位上都允许出现零），假定所有数字都是等可能的，而且互不相关. 在这个消息中的信息量是多少? 如果这个消息只是由五个二进制数字组成，那么这个消息所含的信息将减少多少?

解：在五个数字组成的十进制数中的信息量是 $I = 5\log_2 10 = 5 \cdot 3.32 = 16.6$ 比特，而在五个二进制数字组成的数中的信息量是 $I = 5\log_2 2 = 5$ 比特，即前一消息携带的信息是后者的 3.32 倍.

5. 无轨电车的电动机有五档速度，它们的概率分别是 $p_1 = 0.08$，$p_2 = 0.12$，$p_3 = 0.15$，$p_4 = 0.28$，$p_5 = 0.37$. 求出这台电动机的可能操作体制的集合的熵.

解：$H = -(0.08 \log 0.08 + 0.12 \log 0.12 + 0.15 \log 0.15 + 0.28 \log 0.28 + 0.37 \log 0.37) = 1.565$ 比特.

6. 一批同类型的元件，根据制造精度分为圆形的和卵形的，又按重量分为较轻的和较重的. 所有这些元件中有 70% 是较轻的，其中 80% 是圆形的. 元件总数中共有 64% 是圆形的. 通过称重量可以得到的关于元件的形状的信息量是多少?

解：我们来编一张这种系统的分布表，这个系统有两个随机变量：X——圆形元件数，Y——轻元件数．对于一个元件来说，这两个随机变量都可以取值 1 和 0．一个随机取出的元件是圆形轻元件的概率为

$$p\{X=1, Y=1\}=0.7\times 0.8=0.56;$$

是卵形轻元件的概率为

$$p\{X=0, Y=1\}=0.7\times 0.2=0.14;$$

是圆形重元件的概率为

$$p\{X=1, Y=0\}=0.64-0.56=0.08;$$

是卵形重元件的概率为

$$p\{X=0, Y=0\}=1-0.56-0.14-0.08=0.22.$$

这里

$$p\{X=1\}=0.64,\qquad p\{X=0\}=0.36,$$

$$p\{Y=1\}=0.70,\qquad p\{Y=0\}=0.30.$$

所以通过称重量（Y）得到的元件形状（X）的信息量是

$$\begin{aligned}
I(X, Y)=\ & p\{X=1, Y=1\}\log\frac{p\{X=1, Y=1\}}{p\{X=1\}p\{Y=1\}}\\
& +p\{X=0, Y=1\}\log\frac{p\{X=0, Y=1\}}{p\{X=0\}p\{Y=1\}}\\
& +p\{X=1, Y=0\}\log\frac{p\{X=1, Y=0\}}{p\{X=1\}p\{Y=0\}}\\
& +p\{X=0, Y=0\}\log\frac{p\{X=0, Y=0\}}{p\{X=0\}p\{Y=0\}}\\
=\ & 0.56\log\frac{0.56}{0.64\times 0.7}+0.14\log\frac{0.14}{0.36\times 0.7}\\
& +0.08\log\frac{0.08}{0.64\times 0.3}+0.22\log\frac{0.22}{0.36\times 0.3}\\
=\ & 0.0561\ \text{十进制单位}\\
=\ & 0.186252\ \text{比特}.
\end{aligned}$$

第六章 控 制

我们在第二章中谈到，控制系统获得所需行为是由控制作用达到的。控制作用使系统取得比没有这种作用时“更好”的状态。

我们将解释“更好”这一词是在什么意义上使用的。

如果我们所谈的是一个用来达到某种目的的人造控制系统，那么这种系统的行为是由设计者来评定的，“更好”一词是指就当事人——这个系统的设计者——的目的来说更好。生物控制系统是在动物界的进化过程中形成的，对此不可能确定必须加以控制的专门目的。尽管如此，“更好的行为”这一概念对于生物系统来说仍有意义。这就是有机体在自然环境中的行为，影响着它的生存和繁殖。所以，作为一个被控系统的有机体，其行为的评价，决定于它与环境的相互作用，因此，更好的行为，必定增进该有机体生存和繁殖后代的机会。

在第二章中谈到，某些外力，特别是可用来控制系统的那些力，就是控制力。对于被控系统，即被控对象，通过作用于其坐标上的力，或改变它的参数，就可以影响系统的行为。例如，对一台涡轮机的转速进行控制，可以通过改变水头 h 来实现，水头表示作用在涡轮上产生转矩的力。但是，如果我们不改变水头的话，也可以取得同一效果，为此我们可以改变导翼（GV）的角度 ϕ，从而改变水相对涡轮转子（TR）的流向，如图 6.1 所示。角 ϕ 的改变引起某些参数的改变，而这些参数决定着涡轮的特性及其内部性质。

在控制过程中，在整个可利用的控制力的变化范围内，选

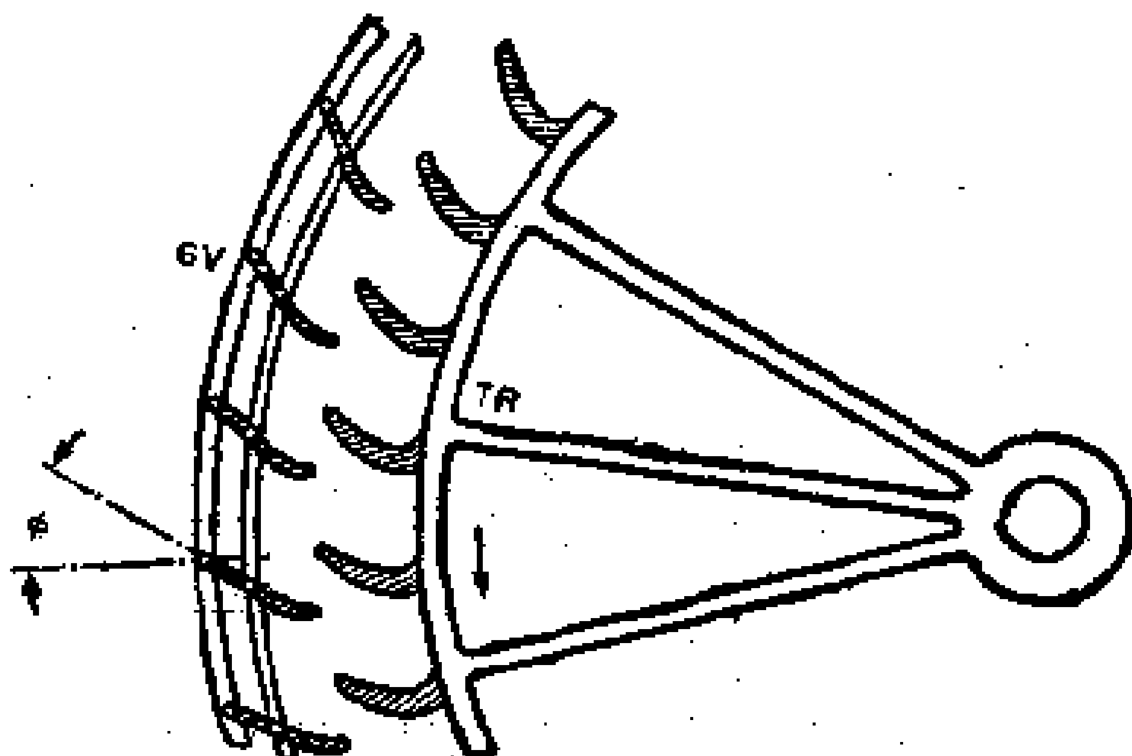


图 6.1. 通过改变导翼角 ϕ 来控制涡轮的转速

取控制作用，这样控制的可能性更大，控制也更有效。但是，我们必须考虑到，在真实系统中，每个控制力的变化范围都是有限的。在控制涡轮的例子中，水头 h 和角 ϕ 都可以变化，但只能在一定范围内变化：

$$h' \leqslant h \leqslant h'', \quad \phi' \leqslant \phi \leqslant \phi''.$$

因为对任何对象的控制都可以用若干控制力来实现，而每一个控制力都受到某些极限值的限制，所以可以在控制力 Y_1，Y_2，$\cdots$，Y_m 的空间里划出一个区域 Ω，它满足条件

$$Y_i' \leqslant Y_i \leqslant Y_i'' \quad (i=1, 2, \cdots, m),$$

区域 Ω 里的点，表示整个控制力的集合（图 6.2）。这个区域叫做可能（控制）力区域。

控制力常常只能取有限个固定值，或者可以认为是取这些值的。这时可能控制力区域将含有有限个可能的控制力集合，我们将称之为可能（控制）力集合。

例如，冰箱里的温度可以通过开关致冷装置而维持在给定值附近。这种系统的可能力集合由两个控制力组成：开和关。

我们现在要解释一下，对于给定的被控对象来说，在给定

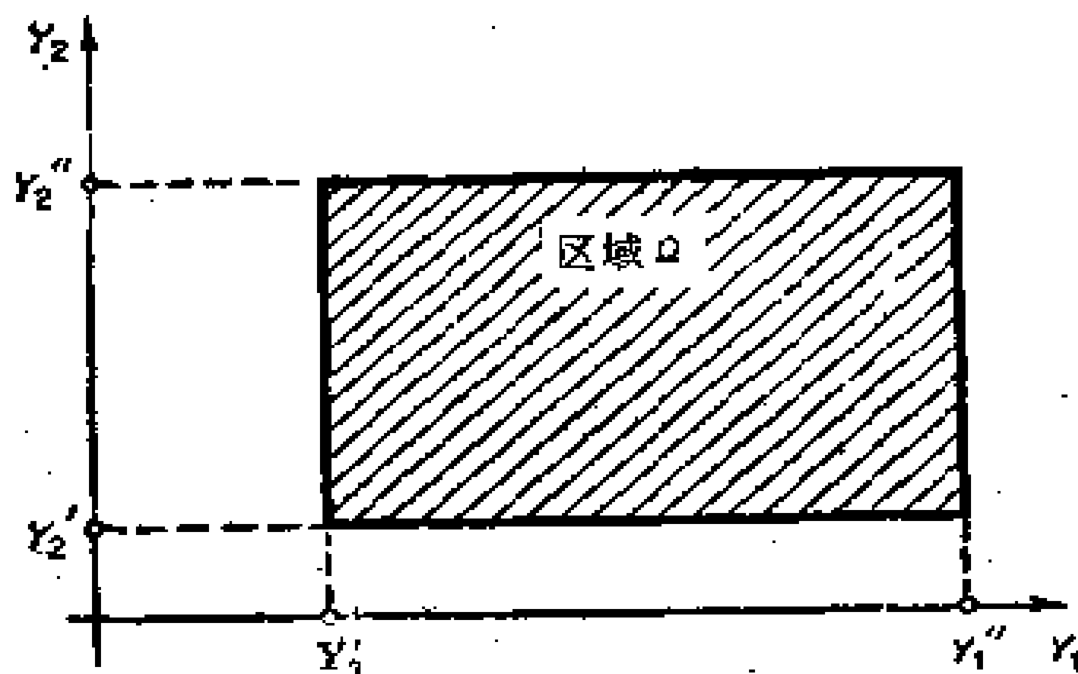


图 6.2. 可能控制力区域 Ω

条件下，要求的控制变量或控制作用的集合，应怎样选择。

为了控制任一对象，必须以某种方式改变控制变量。这种改变可以由控制信号引起，控制信号携带着关于控制变量的所需值的信息。系统中产生控制信号的元件集合叫做控制装置。如果所需的对象行为和有关性质是事先已知的，那么就可以用控制程序的形式，把关于控制力序列的信息引进控制装置。

在其他场合，当事先不知道控制程序所需要的全部数据时，我们可以在系统工作期间获得这些必要的信息。这种信息可以是关于被控系统状态的数据、关于所要求状态的数据、关于扰动的数据或关于被控系统性质的数据。按一定的法则在控制系统中加工这个信息，就能用它来产生需要的控制力。把进入控制系统的信息，变为控制信号的这些法则，叫做控制算法。

不仅在保证系统正常工作时需要控制，而且在保证系统向所要求的方向发展时，也需要控制；例如一个细胞核发育成有机体，或者发展一个运输系统时，都需要控制。

发展的控制依赖于一项发展计划和该计划的实施。活机体的发展计划是以遗传信息为依据的，这种信息以大分子的

形式进入细胞核成分。任何经济系统的发展计划，都是一份含有关于投资、改建工作等活动信息的文件，这些活动使经济系统的功能和结构发生所要求的变化。

考虑到上面所描述的概念，我们可以定义“控制”如下：

为了“改善”某个或某些对象的功能或发展，需要获得并使用信息，以这种信息为基础而选出的、加于该对象上的作用，就叫做控制。

如果控制的任务是使对象的状态稳定，那么可以把控制解释为一种对干扰的积极防御。

与积极防御相反，消极防御在于，赋予对象这样一种性质，它的输出值（即我们所关心的对象状态的功能）对干扰的依赖性很小。

下面是消极防御的几个例子：抛锚的船的船位不取决于风和水流；保温瓶，它限制了容料和周围介质之间的热传递；高关税壁垒，它保证了本国工业在国内市场上的竞争能力；柯氏结核杆菌的类脂壳，它保护杆菌不受白血球和药物的侵犯；极地植物的贴地形态和沙漠植物的小蒸发表面；机器零件的抗腐蚀涂层。

与消极防御正相反，控制系统可以组织控制力来抵抗干扰。例如，在上面这些例子中，船位的稳定可以通过适当的操纵来达到；任何物体的温度可以通过控制从外部热源输入的热流来维持；工业竞争能力可以通过提高生产力和降低生产成本来保证；细菌可以分解药物并以这种方式改变自己的新陈代谢，以使药物对之无害；植物可以通过开闭气孔、折叠叶子或落叶等方式来控制蒸发等。

6.1. 控制系统

被控对象和与之相连的控制装置一起，构成一个控制系

统. 在加工信息 Z 的基础上，控制装置产生控制信号 U，若要它能够改变控制作用 Y，就需要某种机构，它能根据控制信号来变换控制作用，这个机构叫做执行元件. 对于只有一个执行元件的简单情况来说，在控制装置（yy）和对象（O）之间，通过执行元件（AO）建立起来的相互作用的方框图，如图 6.3 所示.

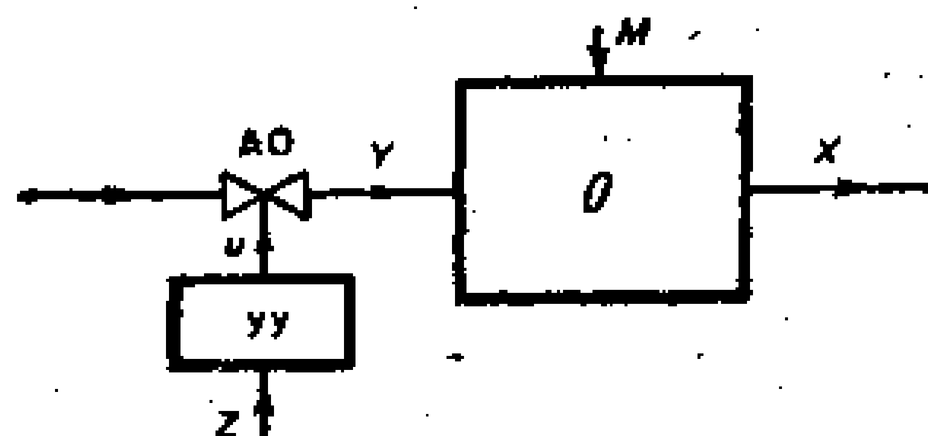


图 6.3. 表示控制装置和被控对象之间的相互作用的图

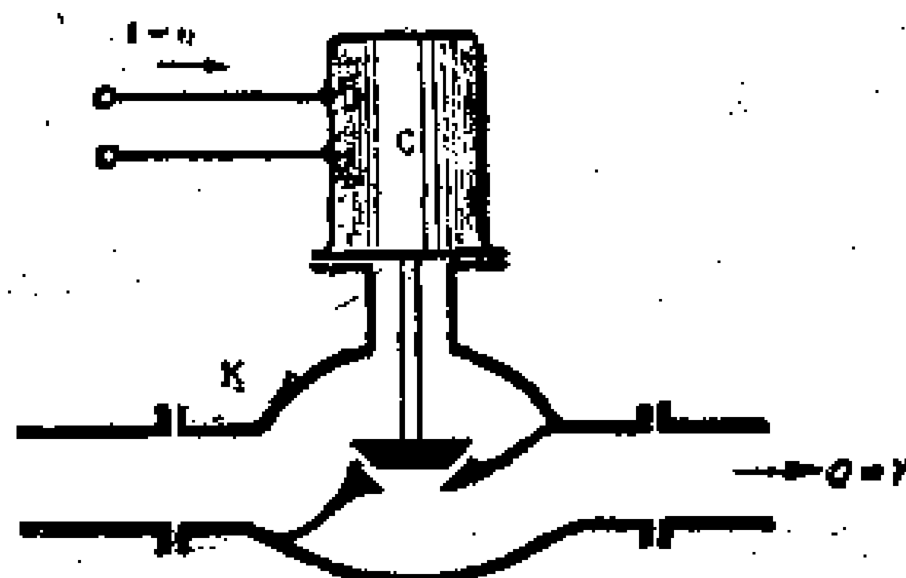


图 6.4. 螺线管控制阀

例如，我们用一个螺线管操作阀作为执行元件(图 6.4)，它在电信号 I（通过螺线管 C 的电流）的作用下，打开或关闭阀 K 中的液流. 人也可以起执行元件的作用，例如舵手根据接到的命令掌舵.

在控制系统中，已解决了下面四种基本类型的控制：稳定(镇定)，完成程序，随动(跟踪)和最优化.

使一个系统稳定，就是要维持这个系统的某些给定值 X_y，

而不管作用在系统上的干扰 M 怎样。例如，为了保证温血动物的正常生活，就必须稳定它的体温、血液成分和血压，而不管周围环境发生了什么变化。在供电系统中，必须稳定这个系统的电压和频率，使它们不随着电能的消耗而改变。

当被控量的给定值 X_{y_0}以预先知道的方式随时间变化时，就出现完成一个程序的任务。例如，在控制一枚弹道火箭时，导引火箭进入一条预定的轨道，就必须按照一项事先知道的程序 $X_{y_0}(t)$，来改变火箭的空间位置和速度。为了控制一架天文望远镜的位置以补偿地球的自转，就必须按照预定的程序来移动望远镜。在生产中，当按一份预定的生产进度表工作时，也发生类似的问题。

在生物学中，"执行一个程序"类型的作用的明显例子有，一个机体从卵细胞开始的发育、鸟类的季节迁徙、昆虫的变态等。

在事先不知道被控量的给定值如何变化的情况下，就产生了跟踪的任务，即尽可能准确地使系统的状态 $X(t)$ 的变化与值 $X_0(t)$ 的变化相对应。例如，在下列情况下就要求进行跟踪：在需求量的改变不可预测的条件下，控制物品的生产；呼吸的节奏和深度需要跟随身体的用力而变化；雷达天线必须跟随飞机的不可预测的运动[1]。

在一些情况下，控制不能叙述为"确保一个系统的状态和一个指定状态间的对应"这样的问题，因为关于这一指定状态的信息不能事先引进控制系统，或者不能在工作期间获得。例如在下列情况下就产生这种系统：控制一个在复杂的变化条

---

1) 为了防止误解，我们要强调指出，例如在最后这个例子中，被控量不是飞机的位置而是雷达天线的位置。$X_0(t)$ 是天线位置的这样一个序列，它总是对准着飞机的。与"完成一个程序"的问题正相反，这个序列不能事先给出，而取决于外部因素——飞机的运动。

件下工作的发电站，而且控制的目的是在任何工作状态中保证发电机的最大效率.

最优化问题——确立在某种意义上是最优的条件——是经常都要遇到的．例如控制一个经济系统以达到最大的利润，控制一个工艺过程以达到原材料和半成品的最小损耗，以及许多别的例子．这些问题将到第十一章再研究.

6.2 直接链和反馈

控制系统的性质，在很大程度上取决于为在控制装置中产生控制信号所用的信息的来源．我们先考察这样的系统，其中由控制装置得到的信息 Z，并不包括关于被控对象的状态 X 的信息．这时 Z 可以包含控制作用变化序列 $Y_0(t)$ 的一个程序，或者包含扰动 $M(t)$ 的信息．在后一场合，为了得到一个控制信号 u，控制装置应当含有这样的数据：为了达到所要求的目标，对于 M 的每个值来说 Y 的值应当是什么．在这种系统中，控制算法将由下列变换组成：

$$u = PM. \tag{6.1}$$

在这个变换中，算子 P 是根据关于控制目的和被控对象的性质的数据，而事先送进控制装置中去的.

例如，在一个加热系统中，设主要扰动是外界温度 θ_M，而控制的目的是把加热室中的温度 θ_x 保持在预先给定的温度 θ_0 周围．这一点可以按所要求的精确度，象图 6.5 所示那样，通过控制加热系统的水温 θ_y 来达到．加热系统的操作者，将观察温度计的读数 θ_M 和 θ_y，并相应地操纵控制元件，以保证所要求的函数关系 $\theta_y(\theta_M)$．上述控制系统的一个特征是，为了产生控制作用，我们并不使用被控量本身的数据——加热室中的温度 θ_x.

如果在一个控制系统中，不把关于被控量的值的信息用

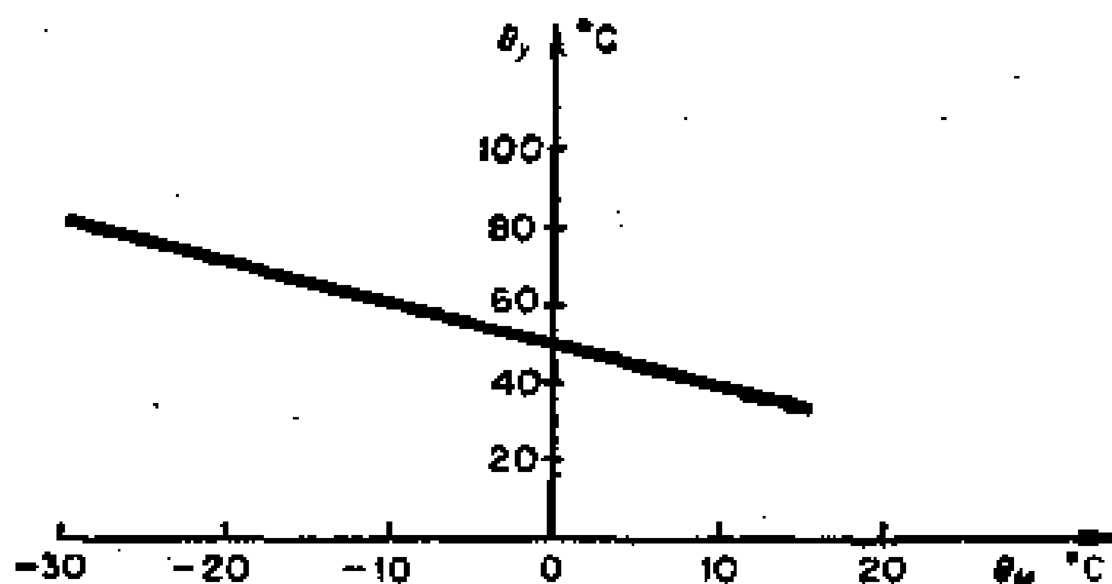


图 6.5. 确定加热系统中所需水温的图

来在控制过程中构成控制作用，那么这个控制系统就叫做开环系统。这种类型的控制系统的结构如图 6.6 所示。

由控制装置 *yy* 实现的控制算法(6.1)，是基于扰动补偿这一观念的：对于每个扰动 M，使用变换(6.1)，就选定一个值 Y，它补偿着 M 对被控量 X_y 的作用。这里控制作用 Y 应当这样选定，使得扰动作用引起的偏差 $\Delta X_y(M)$ 与控制作用引起的偏差 $\Delta X_y(Y)$ 之和等于零。即

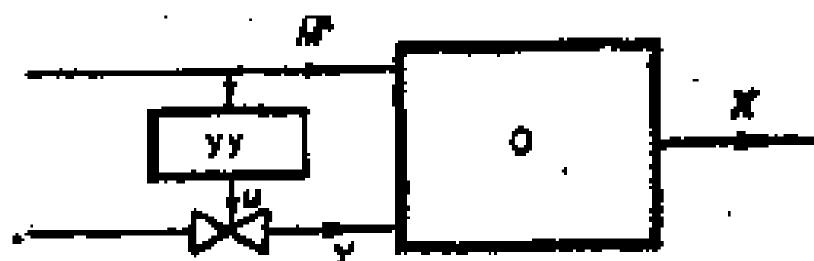


图 6.6. 开环系统的图

$$\Delta X(Y) = -\Delta X(M). \tag{6.2}$$

从(6.2)可以看出，为了选择一个控制力，重要的是，要用到关于扰动对被控量的影响的信息，而不是关于扰动本身的信息。所以，可以不用直接测量扰动就组织起一个控制，为此只要监视由这些扰动对被控系统造成的偏差就行了。关于被控量 X_y 相对预定值 X_{y_0} 偏差的信息，可以看作是获得关于扰动的信息的一个间接方法。

上述考虑表明，控制信号也可以由关于被控量离它预定值的偏差的信息产生。

例如可以这样来控制一个加热系统，要求工作人员在加

热室温度 θ_x 下降一个给定值 θ_0 时，提高加热系统中的水温 θ_y，在相反的情况下，则降低水温。这时，控制算法将包含关于被控量的值的信息，因为控制装置实现下列变换

$$u = P(X, X_0), \tag{6.3}$$

这里 P 是算子，它实现值 X 与 X_0 的每个组合与值 u 之间的对应。

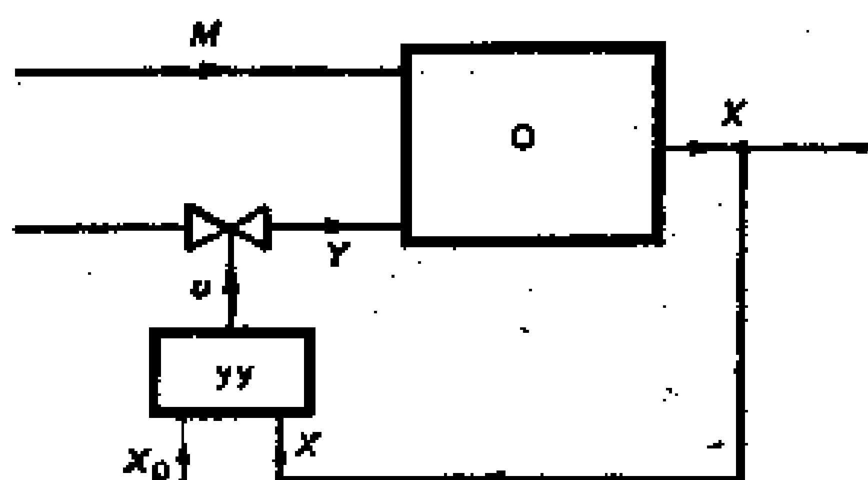


图 6.7. 闭环系统反馈的图

如果在一个系统中，用关于被控量的值的信息来产生控制力，则这种系统叫做**闭环系统**。闭环系统的结构如图 6.7 所示。有这种结构的系统之所以叫做"闭"的，因为在系统的控制力传输的线路中存在一个闭环。从这个线路的任何一点出发，沿控制力的方向移动，我们还回到出发点，例如沿着环 $u \to Y \to X \to u$。

在系统的第 i 个元件的输出力 X_i 和任何别的第 j 个元件的输入 Y_j 之间的关系叫做直接链。在同一个元件的输出 X_i 和输入 Y_i 之间的关系叫做反馈。

反馈可以是从系统的输出直接联到输入，也可以是经由系统的其他元件产生的。从图 6.6 和图 6.7 可以看出，在开环控制系统中仅用到直接链，而在闭环系统中还用到反馈。例如在图 6.7 中输入——加于对象 O 的控制力 Y——因通过控制装置 yy 的反馈而依赖于它的输出值 X。在系统的输出元件与输入元件之间的链之所以叫做反馈，是因为这时力的传输方向与这一元件中力的传输方向相反。

反馈是最重要的控制论概念之一，它有助于我们理解在各种类型的控制系统中出现的许多现象。在研究活机体中的、经济结构中的和自动控制系统中的过程时，都可以发现反

馈.

如果反馈使系统的元件的输入对输出的影响增加，这个反馈就叫做正反馈；如果使这种影响减少，就叫做负反馈.

例如，与视野中的亮度范围相比，较负反馈将使象在视网膜上的亮度变化范围更狭小些．按视网膜上的亮度而改变瞳孔直径，就可以做到这一点．由于负反馈，实际上可以消除电子放大器的参数对放大器功能的影响．正反馈在许多种工程设备中，用来增加传输系数.

一般说来，当系统的稳定性被外力所干扰时，负反馈就重新建立起这个系统的稳定性，而正反馈将产生一个比外力单独引起的偏差更大的偏差.

应当注意，任何有反馈的系统中，都含有力的传输的一个闭环.

闭环控制系统的优点是，在扰动相当大而并非所有扰动都是可测量的条件下，这种系统可以完成必要的控制．如果作用在被控变量上的扰动的影响事先是不知道的，那么在这一条件下，闭环控制系统也适用.

开环控制系统的优点是：当扰动在某种程度上来得及影响被控系统的值之前，控制力就直接按照扰动的变化而变化.

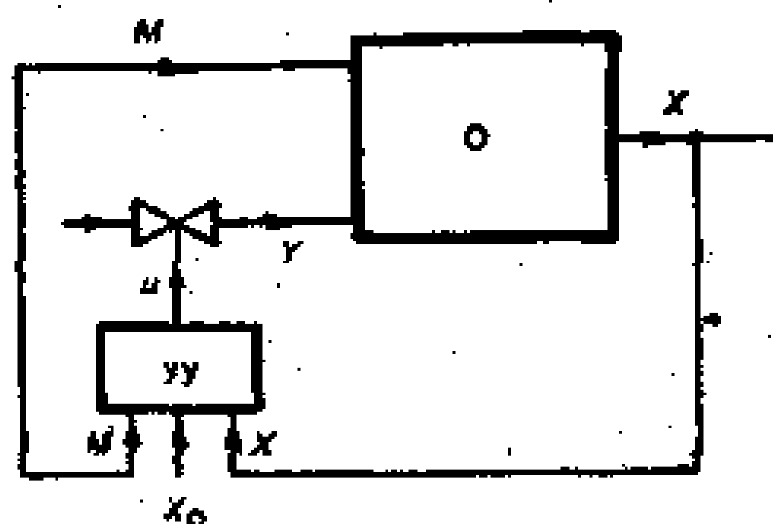


图 6.8.　组合控制系统的图

可以把开环控制系统和闭环控制系统混合起来，我们将称之为组合控制系统；这种系统的结构如图 6.8 所示．这里使用了关于基本扰动的信息，以及关于被控量的值的信息，来产生控制信号，控制装置的操作算法在于实现下列变换

$$u = P(M, X, X_0). \tag{6.4}$$

在以下讨论的例子中，这种控制方法是通过对有关人员发出下列指示而实现的。按图 6.5 确定温度 θ_y，然后观察温度 θ_x 离开预定值 θ_0 的偏差。变化 θ_y 使这一偏差减到最小。对扰动的一个迅速而近似的补偿是由控制作用的第一部分达到的，它取决于被控量的偏差，并把这一偏差缩小为一个可容许的值，而不管偏差是如何引起的。

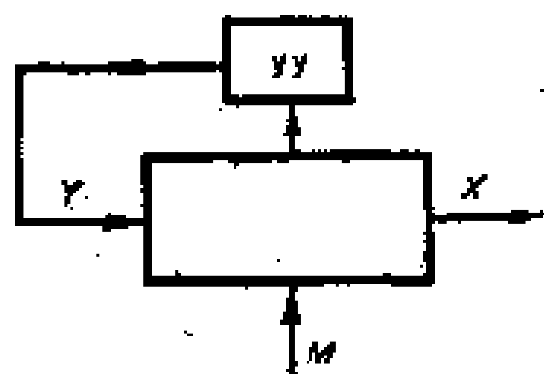


图 6.9. 控制系统

6.3. 控制的限度

为了估价可能的控制的限度，并揭示原理上可能达到的控制的质量，我们将控制系统看作是一个独特的信息传输系统(图 6.9)。为简明起见，我们将限于考察这样的被控对象，它是一家只有一个输出值 X 和一个控制作用 Y 的工厂，受到唯一的扰动 M 的影响。

设控制的目的是把 X 维持在一个不变的水准 X_0 上。在此情况下，控制质量可以从被控量 X 的不定性程度 $H(X)$ 来评价。如果控制是理想的：$X = X_0$，那么不定性程度——熵 $H(X)$——将等于零。

我们假设，在随机扰动 M 的影响下，值 X 发生波动，与其规定值有一随机偏差，它的熵 $H(X) = H(X(M)) = 0$。这时控制系统将起一种校正装置的作用，它将降低 X 的值的不定性。当存在控制信号时，被控量的不定性是 $H(X/Y)$。于是系统状态中的不定性降低的程度可表达为

$$H(X) - H(X/Y) = I(Y, X), \tag{6.5}$$

即相对量 X 来说 Y 中的信息量（Y 看作随机值，即看作是以确定概率使用的所有可能控制力的集合）。为了保证不定性能够降低，这个控制系统应当具有足够多种的控制力，并与关

系式

$$H(Y) \geqslant I(Y, X) \tag{6.6}$$

相符合(见第五章)。从(6.5)和(6.6)可看出，当存在控制时X中的不定性满足不等式

$$H(X/Y) \geqslant H(X) - H(Y). \tag{6.7}$$

不等式(6.7)表示了控制的限度。我们要强调指出，在(6.7)式中，仅当在控制信号Y和被控量X之间存在一一对应时，等式才成立，换句话说，在随机扰动M的作用下，控制系统能准确地给出X的偏差量，并且非常精确地产生所需的校正信号Y，只有这时等式才成立。但是事实上，不管是随机扰动，还是这些扰动与量X变化间的关系，都是不可能充分考虑到的。同样地，不可能绝对精确地产生X的变化，正是这个X值确定闭环控制系统中的控制力。进一步来说，控制系统本身是受随机扰动影响的，所以信号Y并不精确地等于所需的校正信号。作为这一切因素的结果，在X的值与控制信号Y之间将没有明确的关系。换句话说，条件熵$H(Y/X)$不等于零。信息量$I(Y, X) = H(Y) - H(Y/X)$(见第五章)。所以X的不定性由

$$H(X/Y) = H(X) - H(Y) + H(Y/X) \tag{6.8}$$

确定。(6.8)式表明，为了改善控制质量[减小$H(X/Y)$]，就必须增加力求达到$H(X)$的控制力的个数$H(Y)$。更简单地说，对于X的每个可能偏差来说，都必须在"储备"中有一个适当的校正信号Y，并且每当遇到X的给定值时，就能使用这个信号。但是，单凭这一点是不够的。还必须保证使控制作用具有对被控量偏差的最大适应性。换句话说，必须产生一个控制作用Y，它能够校正在值X中实际出现的偏差，这意味着必须力求减少控制信号$H(Y/X)$的非唯一性。为此目的，需要关于被控系统与作用在其上的扰动以及控制系统本

身的非常精确详细的信息。

在不少场合，控制的可能性也受到其他一些因素的限制，例如受到沿直接链和反馈通道信息传输的有限速度的限制。此外必须记住，条件熵 $H(X/Y)$ 通常不能作为控制质量的概括一切的特征，因为这个熵仅取决于随机值的概率分布，而与随机值的大小无关。

但是，在这种场合，控制系统中随机偏差的大小，比它们的概率更为重要。例如，我们假设，必须保持 $X=X_0$，而控制系统在一种场合保证值 X 及其概率如表 6.1 左方所示，而在另一场合 X 的值及其概率则如表 6.1 的右方所示。显然在实际情况下，我们宁可选择第一种，虽然在第二种场合熵要小得多。对于在这种或那种条件下的控制限度问题，至今还没有一般的完全的解法可用。

表 6.1

X_i	$0.99X_0$	X_0	$1.01X_0$	X_i	$0.5X_0$	X_0	$1.5X_0$
p_i	1/3	1/3	1/3	p_i	1/6	2/3	1/6

练习

1. 一个控制器必须保持电镀槽中的溶液具有一定的温度和液位。电镀槽中的温度可能上升，而液位仍然不变，或者当液位上升时温度降低了，等等。在这种种情况中，控制器必须以适当的方式作出反应。输入力的集合怎样表达？写出这个系统的控制算法，为简单起见设被控量是独立的。

解：输入激励的集合：（a）液位降落，（b）液位上升，（c）温度降低，（d）温度升高。

这个系统的控制算法：

（a）当液位降落时打开进液阀；并关上溢出阀；（b）当

液位上升时关上进液阀，并打开溢出阀；(c) 当温度降低时增加馈给加热器的热量；(d) 当温度升高时减少馈给加热器的热量。

2. 在下列过程中，控制系统 (A) 和被控系统 (B) 是什么？在此过程中，要解决的控制任务是什么？

(1) 一年生植物中的生长循环。

(2) 鱼洄游到产卵场。

(3) 鸟哺雏。

(4) 雌雄交配。

(5) 性选择。

(6) 在一定地区控制给定种属的动物种群。

(7) 私营企业生产条件下的生产控制。

(8) 社会生活的法律调节。

(9) 人类行为的道义控制。

(10) 民主选举。

解：(1) A——基因型[1]，B——表现型[2]；完成一个程序。

(2) A——基因型，B——表现型；完成一个程序。

(3) A——基因型和神经系统，B——躯体。基因型的任务是完成一个程序，神经系统的任务——跟踪。

(4) 同 (3)。

(5) A——基因型，B——种群[3]。任务——最优化。

(6) A——生物的均势[4]。B——给定种属的种群。任务——稳定化和跟踪到底(在外部条件变化期间)。

(7) A——行情，B——生产。任务——跟踪和最优化

---

1) 基因型——这样或那样的机体的遗传因子(基因)的集合。

2) 表现型——一个机体的所有个体特征的集合。

3) 种群——在已知时刻居住在一定空间范围内的给定种属的集合。

4) 生物的均势——彼此相关又与环境相关的机体的复合体。

(在下列意义上：以最好的方式接近客观的经济定律和发展趋势)。

(8) A——国家，B——个人。任务——稳定化(稳定一个给定的社会系统)。

(9) A——统治阶级，B——个人。任务——稳定化(稳定社会关系和组织形式)。

(10) A——社会(社会阶级和阶层组成的系统)，B——行政部门的成员、任务——最优化(在下列意义上：以最好的方式反映大多数选举人的政治愿望)。

3. 下列系统完成的是什么控制任务？(a) 挡风玻璃的雨刷；(b) 控制反火箭导弹的系统；(c) 水下呼吸器；(d) 路灯开关系统；(e) 恒温器；(f) 控制仿形铣床导板运动的系统；(g) 动物的呼吸系统。

解：(a) 使挡风玻璃的透光系数稳定；(b) 跟踪与执行一个程序；(c) 使进入防水面罩的气压稳定；(d) 完成一个程序；(e) 使温度稳定；(f) 跟随样板；(g) 变化的内外条件下的最优化。

4.(续)。上述系统中哪些是开的？哪些是闭的？画出方框图。

解：(a) 开；(b) 闭；(c) 闭；(d) 开；(e) 闭；(f) 闭；(g) 闭。

5. 在图 6.9 中表示的系统中，被控量 X 的熵 $H(X/Y)$ 不应超过 0.35 比特。作用于这一系统上的扰动 M 表示为表 6.2。

表 6.2

M	1	2	3	4
p_i	0.2	0.3	0.1	0.4

表中顶上一行规定了扰动的类型，底下一行规定了相应扰动出现的概率。假设控制机构是理想的。根据这个假设，试计算为了达到所要求的控制质量而必须引进的信息量，

并说出控制作用应有的数量(多样性).

解：在没有控制作用时，量 X 的熵是

$$
\begin{aligned}
H(X) = H(M) &= -\sum_{i=1}^{i=4} p_i \log_2 p_i \\
&= -0.2\log_2 0.2 - 0.3\log_2 0.3 - 0.1\log_2 0.1 - 0.4\log_2 0.4 \\
&= 1.85 \text{ 比特}.
\end{aligned}
$$

因为按条件，$H(X/Y) \leqslant 0.35$ 比特，所以 $I(Y, X) = H(X) - H(X/Y) \leqslant 1.85 - 0.35 = 1.5$ 比特. 输入作用所必需的多样性由式

$$H(Y) = I(Y, X) + H(Y/X)$$

来确定。对于理想系统来说 $H(Y/X) = 0$，所以

$$H(Y) = I(Y, X) \geqslant 1.5 \text{ 比特}.$$

第七章　自动控制

所谓自动控制，我们通常理解为是一种无须人直接参与的控制。但是，这个定义并没有精确地表达出这一术语的完整意思。首先，必须更精确地规定我们如何理解“直接参与”这一词。要为人的利益实现一项控制，他就必须参加到控制过程中去。如果做不到这一点，被控过程迟早要偏离人们希望的那种样子。这些偏离的原因可能是：系统元件的不可避免的老化和损坏；环境的改变；或者人的目的的改变。所以人类参与为他服务的控制系统的工作是不可避免的。

随着控制技术的改进，人类参与控制过程的方式越来越成为间接的了。首先，他不必直接地给控制元件加力了，而把这个工作交给一个技术的执行机构，人自己则通过发出控制信号来操纵它。第二步是他本身也不必做发出控制信号的工作了，而把这个职能转交给一个技术的控制机构，他自己则把调节的要点馈给这个机构使它决定所希望的值，这是根据人们所规定的控制任务而由技术装置实现的。人逐步摆脱作为直接作用力的过程，意味着技术装置的功能在扩大。随着控制工程的发展，这个过程将不断地向前发展。

人参与控制工程系统的程度，就这样从本质上不断地变化着，在有人参与的系统和无人参与的系统之间，将没有鲜明的界限。

如果我们所谈的是生物控制系统，那么根据人是否参与控制把这种系统分为自动的与非自动的，就完全没有意义了。例如，人并不参与对鸟的飞行的控制，但是很难把鸟列为自动

系统。在人体内，控制各器官的系统中，这条准则就更加不适用了。

所以我们在这一章中，将只考察对工程上人所设计的人工系统的控制，而且我们将把那些本质上只是相对自动的系统叫做自动系统。

7.1. 自动控制系统的元件

为了实现一个自动控制系统，至少需要三种基本元件：测量元件、控制元件和执行元件（图 7.1）。这些元件与对象（设备）相连接，一起构成一个自动控制系统。

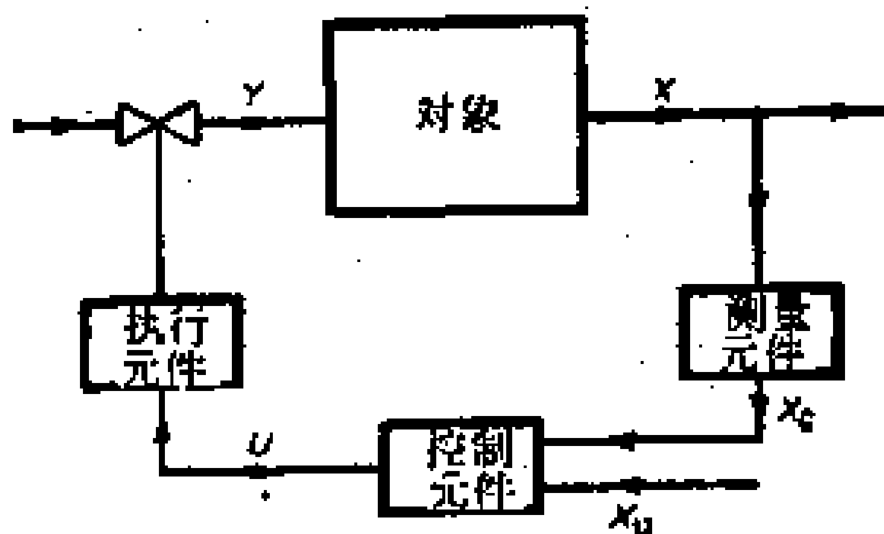


图 7.1． 自动控制系统

测量元件的功用是产生表征被控量 X 的大小的信号 X_c。我们通常用传感器作为测量元件，传感器把被控量 X 变为一个唯一的对应量——信号 X_c，这个信号便于传输到控制元件以便于进一步的利用。测量元件实现下列函数变换：

$$X_c = f_c(X), \tag{7.1}$$

特别是实现线性变换

$$X_c = k_c X, \tag{7.2}$$

这里 k_c 是测量元件的**传输系数**。一批广泛得到使用的测量元件的简图如表 7.1 所示。

最简单的控制元件可能是用来比较下面两种信号的元

表 7.1. 测量元件

压力	膜片式	波纹管	测压管	钟式	圆环式

流速	差动流速计	可变孔式	容积式流速计	风扇式	降落式

液位	浮子式	测压液位计	重量液位计	差动液位计

角速度	离心摆	感应转速计	测速发电机	凸轮机构

温度	接触温度计	压力式温度计	双金属温度计	热电偶	电阻温度计	膨胀计

电压或电流	电磁式量计	磁电式量计	静电计	示波管

件：表征被控量值的信号 X_c 和表征所希望的被控量值的信号 X_0。这种控制元件产生控制信号 u，它是对信号 X_0 与 X_c 进行比较的结果，并取决于它们之差

$$u = f_u(X_0 - X_c). \tag{7.3}$$

在特殊情况下，这个控制信号是被控量对其预定值的偏差的线性函数

$$u = k_u(X_0 - X_c), \tag{7.4}$$

这里 k_u 是控制元件的传输系数。广泛使用着的比较元件的简图如表 7.2 所示。常常会发现信号 u 的功率还不能使系统的执行元件动作。如果情况确实是这样，就必须增加一个功率放大器。典型的放大器的简图如表 7.3 所示。

表 7.2. 比较元件

机械和液压器	差动比较元件		
比较元件	电阻式	电感式	电容式
力的比较元件	权重装置	节流装置	
电气比较元件	电压比较	电气差动比较	
电气比较元件	电磁式与变压器型装置		

表 7.3. 放大器

类别	放大器		
气动与液压放大器	气动放大器	气动放大器	喷射管
	液压放大器	液压放大器	
电气放大器	电解电位计	差动变压器	
	磁放大器	电机放大器	电子放大器

我们将把输入值和输出值之间有函数关系的元件叫做静态元件．上面所述的元件显然可以列入静态元件一类．

通常还用另一类元件——无静差元件(或动态元件)——作为校正伺服元件，这一类元件中的输入值是和输出值的变化率有函数关系的．

于是对于最广泛地使用的校正伺服装置来说，变换特性可以写成

$$v_Y = f_Y^*(u), \tag{7.5}$$

这里 v_Y 是控制作用的变化率，对于线性情况，

$$v_Y = k_Y^* u, \tag{7.6}$$

其中 k_Y^* 是传输系数．无静差元件的特性是，仅对一定的输入值(通常是零)来说输出值才保持不变． 一个具有(7.6)式所示特性的无静差元件，当输入 u 取各种值时，其输出值作为时间函数的变化，已具体地画在图 7.2 中了．

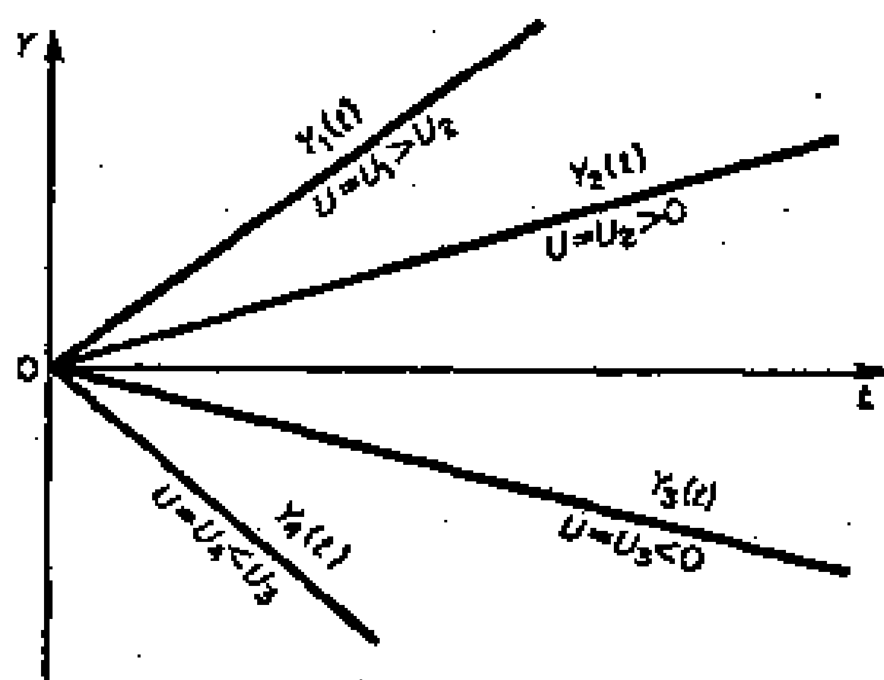


图 7.2． 无静差元件的输出随时间的变化

在某些自动控制系统中，可能用到静态的校正元件，它的变换特性是

$$Y = f_Y(u), \tag{7.7}$$

而对于线性元件来说，则具有传输系数 k_Y：

$$Y = k_Y \cdot u. \tag{7.8}$$

广泛使用着的最后一级控制元件如表 7.4 所示:

表 7.4. 最后一级控制元件

气动-液压伺服机	液压伺服机			膜片	
电伺服机	电磁式	直流电动机	交流电动机	热拖动装置	

7.2. 自动控制系统

作为一个例子，我们将考察控制气罐 GR 中气体压力 P 的自动系统，如图 7.3 所示.

这个系统中的测量元件是波纹管 B（有弹性的金属容器），它产生的力 F_c 与压力 P 成正比. 在控制元件 C_E 中，把力 F_c 与表征气罐中预定压力的力 F_0 进行比较，这里 F_0 是通过弹簧 S 的张力而实现的. 重杠杆 WL 的倾侧改变了从喷嘴 N 来的压缩空气流所通过的间隙的大小，同时也相应地改变了空气压力 P_a. 最后的膜片元件 D 把蝶形阀 V 推到一个与压力 P_a 有关的位置上，因此就改变了阀门 V 的流量 R_1，也改变了进入气罐的气体量. 校正是以下列方式选定的，使得气罐中压力的低落将打开进气阀，反之则关闭它. 控制 R_1 的变化总是力求防止气压的偏差，这种偏差是由于负载变化（气体

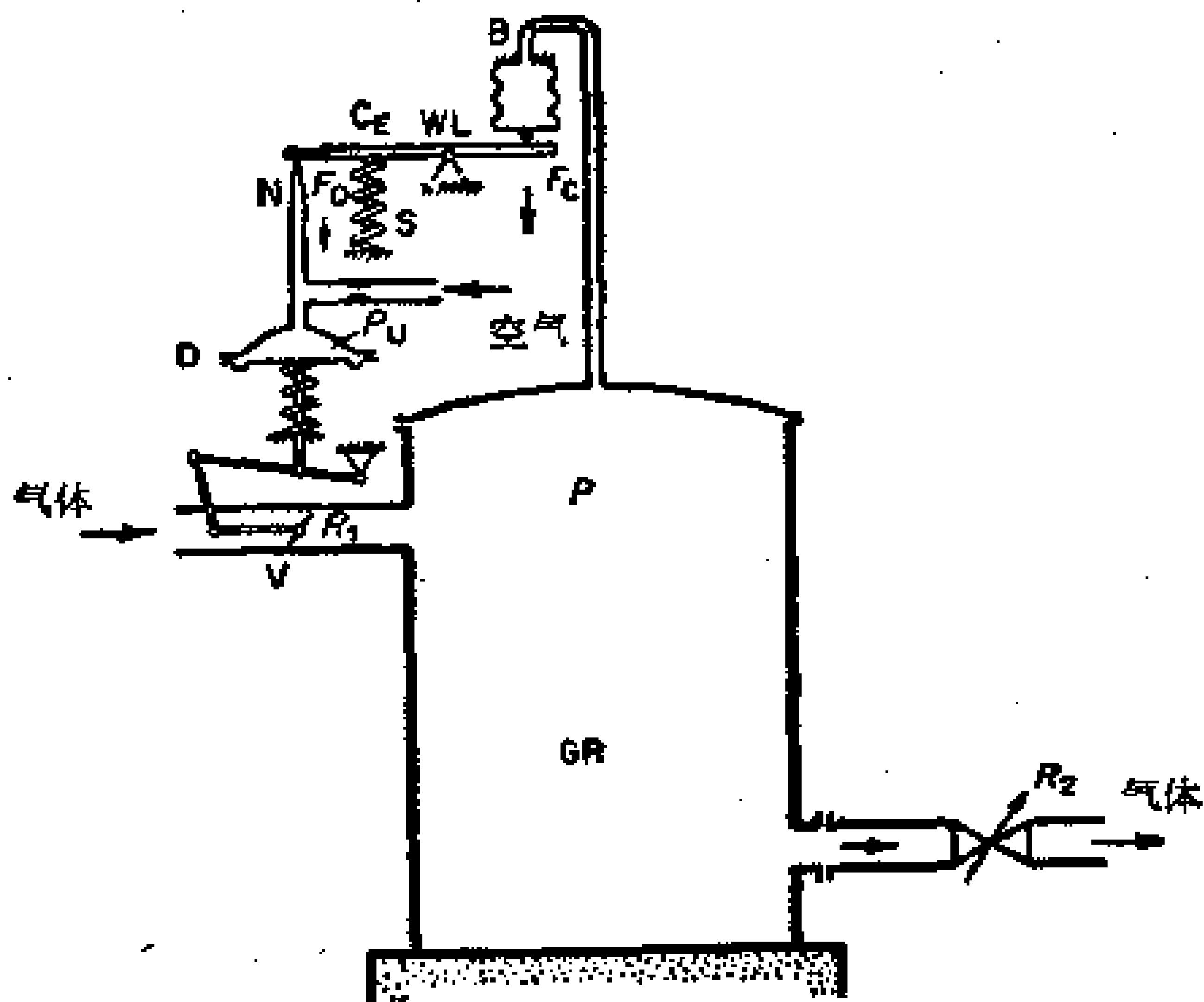


图 7.3. 控制气体压力的系统

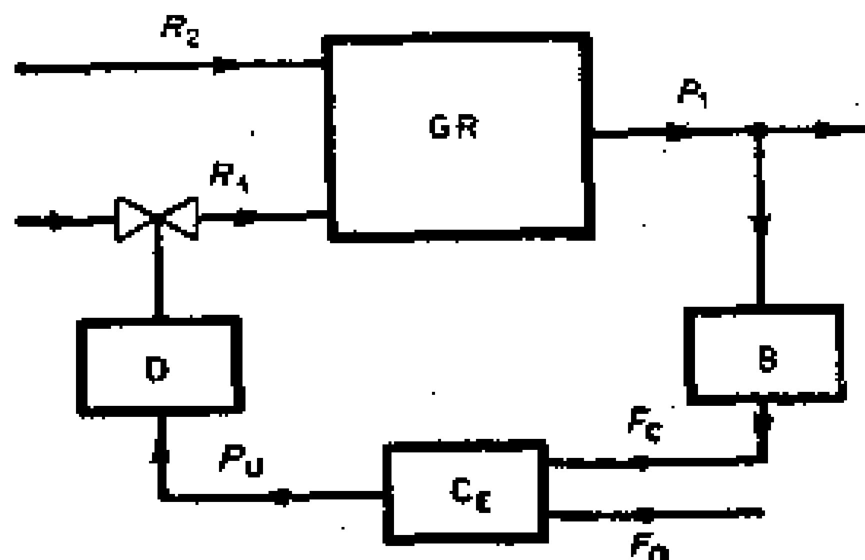


图 7.4. 气体压力控制系统的方框图

用户的总流通容量 R_2) 所引起的气罐中流出的速度改变造成的。

上面所述的控制系统的简化模型是方框图 7.4，可以看出它的结构与一般图 7.1 并无不同。

被控值 P 取决于控制量 R_1 和扰动 R_2，这一依赖关系表达为整个对象的一族特性曲线，在上面所给的情况中，就是图

7.5 中的曲线 1，2，3. 对于接近预定压力 P_0 的压力来说，可以近似地假设这三条特性曲线都是线性的，并有相同的斜率

$$k_0=\frac{\Delta P}{\Delta R_1}.$$

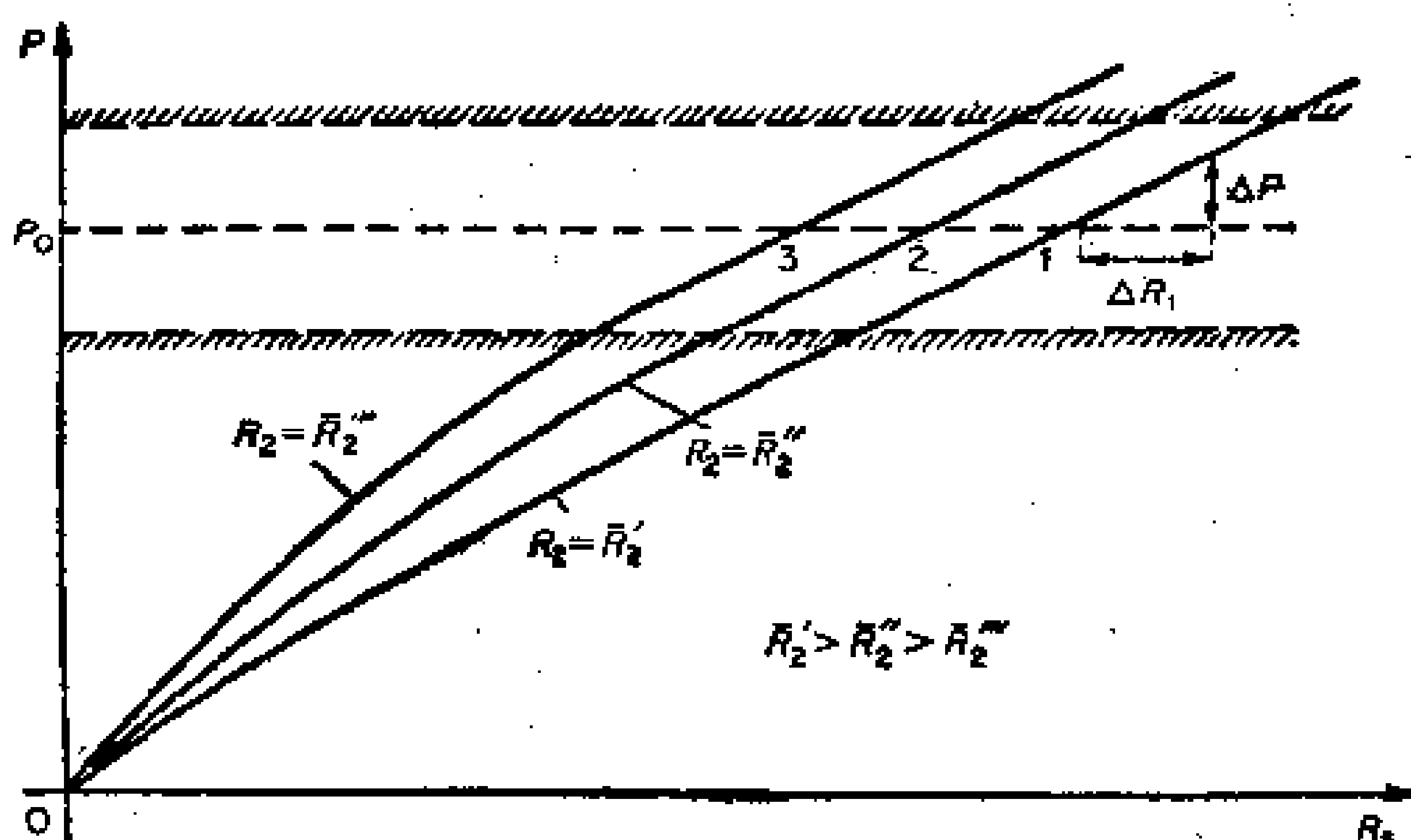


图 7.5. 被控值 P 对控制 R_1 和扰动 R_2 的依赖关系

由负载 R_2 的变化而造成的特性曲线的移位，可以用系数 k_M 反映出来，它表征负载 R_2 对压力 P 的影响. 考虑到上述这一切，这个被控对象的静态特性可以表为

$$P=k_0R_1-k_MR_2. \tag{7.9}$$

考虑到在这个系统中所用的全部元件都是静态的，并设它们都是线性的，我们使用在 7.1 节中给出的式子，就得到下列方程组，它描写了这个系统的静态性质：

$$\left.\begin{aligned}
F_c&=k_cP, &&\text{(a)}\\
F_0&=k_cP_0, &&\text{(b)}\\
P_u&=k_u(F_0-F_c), &&\text{(c)}\\
R_1&=k_yP_u, &&\text{(d)}\\
P&=k_0R_1-k_MR_2. &&\text{(e)}
\end{aligned}\right\} \tag{7.10}$$

我们从方程组(7.10)中相继地把前四个方程代人(e)，就消去了中间坐标而得到

$$P = \frac{KP_0 - k_M R_2}{K+1}, \tag{7.11}$$

这里 $K = k_0 \cdot k_y \cdot k_u \cdot k_c$ 是系统的传输系数，(7.11)叫做这个闭环控制系统的静态特性.

从(7.11)可以看出，气罐中的压力 P 可以看作是由 P' 和 P'' 这两部分组成的.

$$P = P' + P'' = \frac{K}{K+1} P_0 - \frac{k_M}{K+1} R_2.$$

分量 P' 取决于预定压力 P_0，传输系数 K 越大，P' 就越接近于 P_0. 第二个分量 P'' 表征扰动 R_2 对被控值 P 的影响，它随着 K 的增大而减小. 此系统之所以具有这个性质，是因为被操纵的变量是同被控量与预定值的偏差成正比的缘故. 这种系统叫做线性**静态系统**.

上述这一切可以推广到一切线性静态系统. 这种系统的静态特性可以写成

$$X = \frac{KX_0 - k_M M}{K+1}. \tag{7.12}$$

这些特性的图象如图 7.6 所示.

在上述这类系统中，控制任务是尽可能地把被控变量保持在预定值附近(而不管扰动如何变化)，所以传输系数 K 越大，问题就解决得越好.

这个结论是不考虑系统中的过渡现象而作出的. 进一步的考察(第 7.3 节)表明，如果考虑控制过程的动力学，那么对于根据系统所有静态性质进行分析而得出的结果，就必须进行较大的修正.

现在我们进一步讨论，当把一个静态校正元件换为无静差的(动态的)元件(例如一个活塞)时，系统性质发生什么变

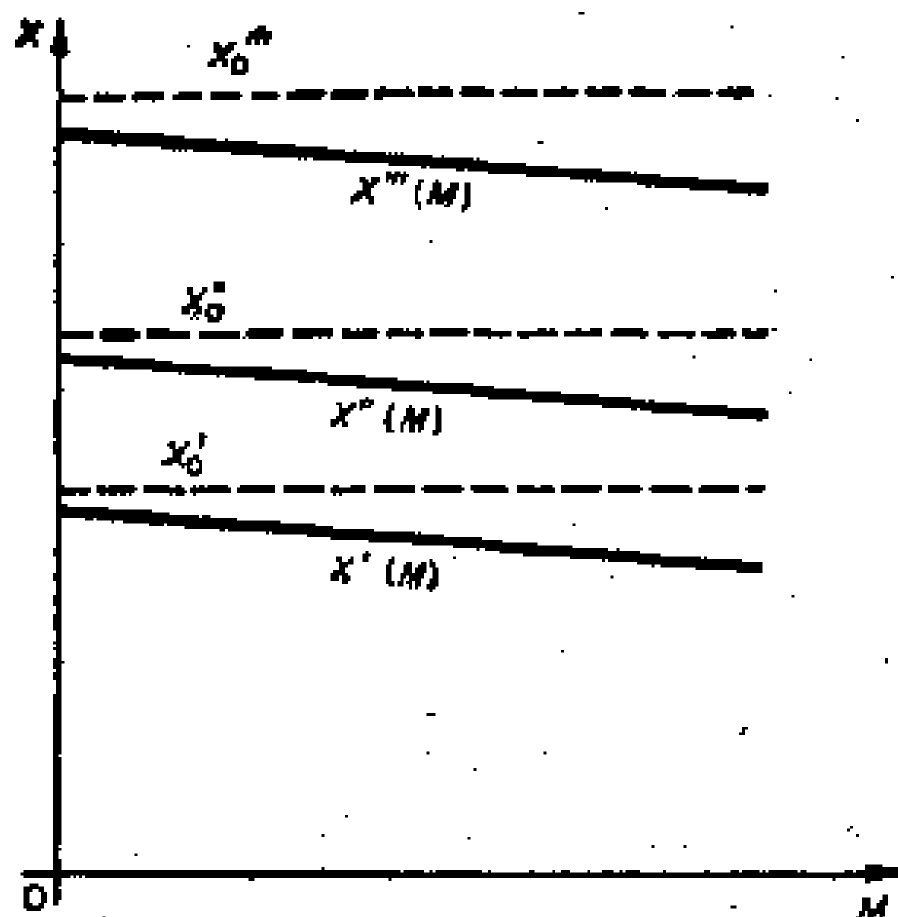


图 7.6. 线性静态系统的特性曲线

化。这时所操纵的变量 $Y = R_1$ 的大小将不再取决于控制信号 $u = P_u$，而是取决于它的变化率 $v_Y = v_R$。按 (7.6) 式，这个校正元件的特性可以写作

$$v_R = k_Y^* P_u. \tag{d'}$$

这个系统的其他一切元件都保持不变，所以只要把方程 (d) 换为 (d')，新系统的一系列方程将与 (7.10) 一样。

由定义，这个系统的各个坐标在稳态时都不应变化，这意味着所有坐标的变化率应当等于零。从 (d') 可以看出，仅当 $P_u = 0$ 时才是如此。但是从 (7.10) 中可推出，仅当被控量的值 P 等于它的预定值 P_0 时，被操纵的变量才等于零。这时被控量的平衡值，将不再取决于扰动，而将精确地等于预定值了。系统之所以具有这种性质，是因为校正作用的变化率同被控量与预定值的偏差成正比。这种控制系统叫做无静差系统。

看上去无静差系统似乎理想地解决了控制问题，但是它们应用起来是复杂的，因为这种系统的动态性质中有不少缺

点(见第 7.3 节)。

7.3. 控制的动力学

自动控制系统的某些与其稳态有关的性质，现在已经得到了解释.

但是，如果不考虑控制过程中出现的过渡体制，就去判断系统的性质，那是危险的. 系统的动态性质可能是这样的，当扰动相继发生变化时，在两个变化间的时间内，过渡过程尚未完成. 再说，稳态可能根本不出现(例如当平衡点是不稳定的时候). 所以，为了评价控制系统的工作能力，非常重要的是，不仅要考虑稳态性质，还应考虑动态性质.

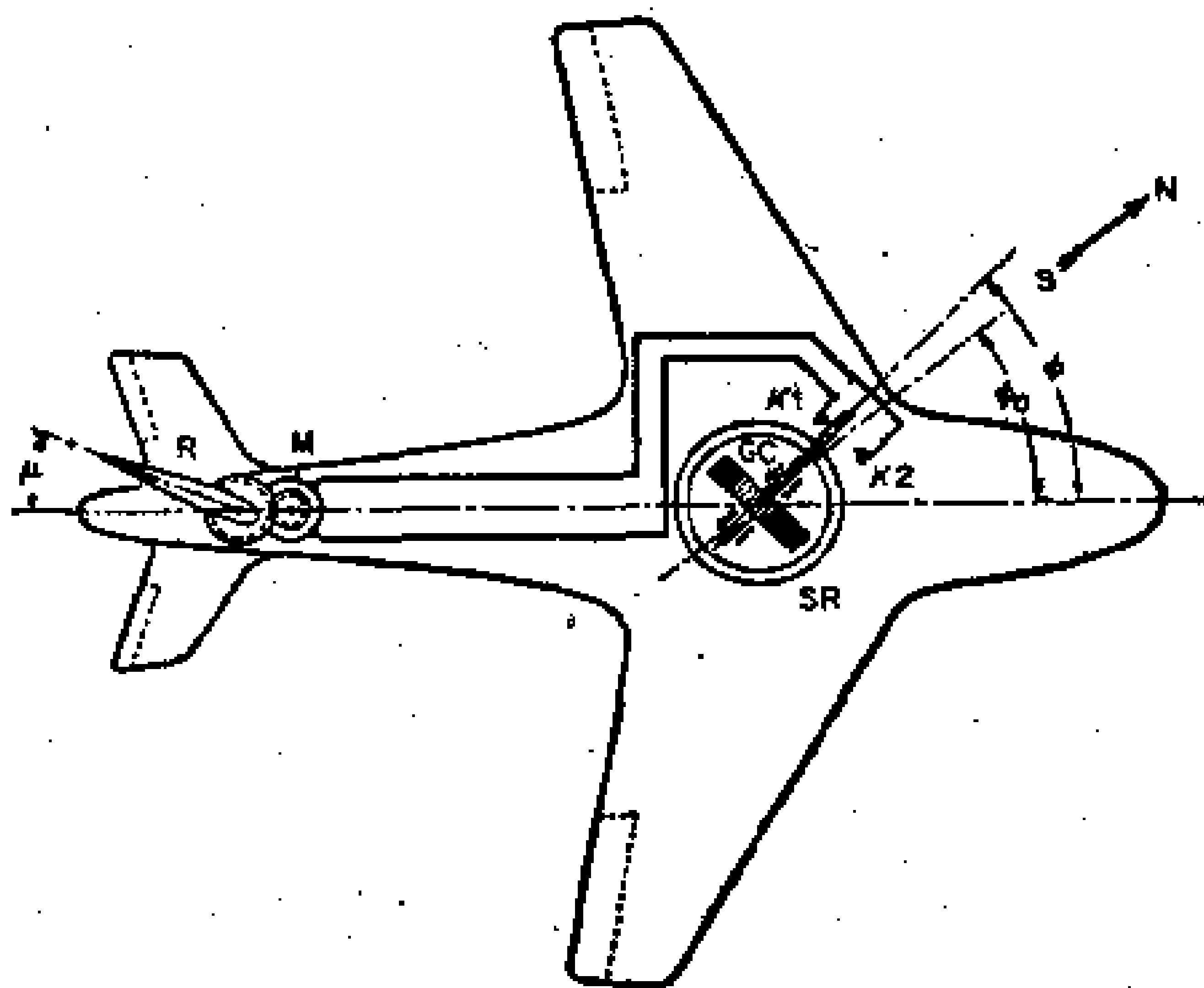


图 7.7. 继电型自动驾驶仪

自动控制系统的某些重要动态性质，可以通过下述例子，用继电型自动驾驶仪控制飞机的航向，加以说明. 这种系统的简图如图 7.7 所示。

这里，测量装置是陀螺罗盘 GC，它相对于飞机纵轴的位置表征飞机的航向 ϕ。控制机构用设置环 SR 表示，把它调整在对应于预定航向 ϕ_0 的位置上，此外还配备有两个触点。罗盘和控制机构间的联系设计成这样，当航向偏向一方时触点 K_1 闭合，当航向偏向另一方时触点 K_2 闭合。这两个触点接通舵 R 的伺服电动机 M，使得舵根据闭合的是哪个触点而转向左舷或右舷，上述联结是这样设计的，当飞机航向向左偏了，舵就向右转；反之，舵就向左转。产生控制作用的目的在于重新建立起预定的航向。

因为这种系统的唯一可能的平衡状态是要保证飞机严格地沿着它的航线飞行（因为只有这时舵才不转动），所以只考虑静态就导致下列结论：这个系统的任务是精确地在稳态中完成的。

但是，现在让我们也考虑一下这个系统中的过渡过程，并验证一下能否确立平衡条件。为此我们作出它的相图。

我们将用角 μ 来表示舵相对其中央位置的偏转角，用 ω_μ 来表示舵的转速。在继电型自动驾驶仪中，舵的转速可以假定取下列值：

$$\omega_\mu = \begin{cases} +\bar{\omega}_\mu, & 如果\ \phi < \phi_0, \\ 0, & 如果\ \phi = \phi_0, \\ -\bar{\omega}_\mu, & 如果\ \phi > \phi_0. \end{cases} \tag{7.13}$$

设航向的变化率直接与舵的偏角成正比，并用 k_μ 来表示舵偏转一个单位值时引起的航向变化率；我们就得到航向随时间变化的规律

$$\phi(t) = \phi_{in} + k_\mu \mu t, \tag{7.14}$$

这里 ϕ_{in} 是航向的初始值。据 (7.13)，舵位的变化（舵以常速 $\bar{\omega}_\mu$ 运动）将按下列规律进行：对于 $\phi < \phi_0$，

$$\mu(t) = \mu_{in} + \bar{\omega}_\mu t, \tag{7.15}$$

对于 $\phi > \phi_0$，

$$\mu(t) = \mu_{in} - \varpi_\mu t, \tag{7.15'}$$

这里 μ_{in} 是舵的初始偏转角.

从 (7.14) 和 (7.15) 中消去时间 t，并引入 $k_\mu/\varpi_\mu = \gamma$，我们就求出相轨迹方程:

对于 $\phi < \phi_0$，

$$\phi(\mu) = \phi_{in} - \gamma_\mu \mu_{in} \mu + \gamma_\mu \mu^2, \tag{7.16}$$

对于 $\phi > \phi_0$，

$$\phi(\mu) = \phi_{in} + \gamma_\mu \mu_{in} \mu + \gamma_\mu \mu^2. \tag{7.16'}$$

相轨迹方程 (7.16) 表示一些抛物线，它类似于在第四章中所考察的液压拖动装置的轨迹. 图 7.8 给出了这个系统的相图，从图中可以看出，一当系统开始振荡，振荡就不会消失，这足以使我们认识到这个系统是不能使用的. 此外，如果我们注意到航向的变化率并非精确地跟着舵位变化，而是因飞机的惯性而出现滞后，那么就看得出，航向的波动不仅不会减弱，而且将每振荡一次都有所增强.

这个系统在它的稳态 ($\mu = 0$, $\phi - \phi_0 = 0$) 周围振荡的倾向，是由于校正装置不断地迟开迟关的缘故(相对 $\phi = \phi_0$

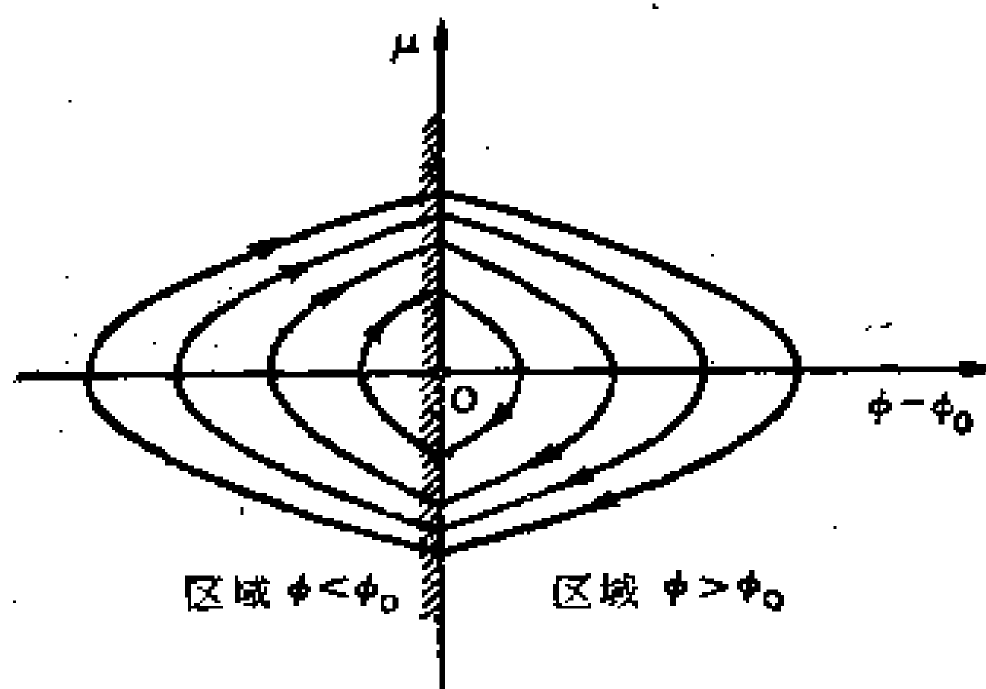


图 7.8. 控制与舵位无直接关系时，飞机航向发生摆动的相图

来说）．再说，在舵返回平均(中央)位置期间，被控值将朝着和初始偏差相反的方向，造成一个离开预定值（$\mu=0$）的更大偏差．为了消除这个现象，使用了各种镇定装置，它们使校正元件提前开关，这至少部分地补偿了上述时滞．一种稳定方法是，在控制元件中引进一个附加的、连到最后的定位元件位置上的联结（PO），在本例中是增加一到舵位上的联结．例如，这可以通过下列方式来达到，把设置环 SR 转过一个与舵的转角 μ 成正比的角度．

这时舵的转速 ω_μ 的变化关系将不再按（7.13）来确定，而将取值

$$\omega_\mu=\begin{cases}+\varpi_\mu, & \text{如果 } \phi+k_c\mu<\phi_0,\\ 0, & \text{如果 } \phi+k_c\mu=\phi_0,\\ -\varpi_\mu, & \text{如果 } \phi+k_c\mu>\phi_0,\end{cases}$$

这里 k_c 是舵的转角与设置环的转角间的比例系数，这时该系统的相图将取如图 7.9 所示的形式．从图 7.9 可见，引进一个连到校正元件位置上的附加联结，将使系统的振荡减弱，而平衡就成为稳定的了．

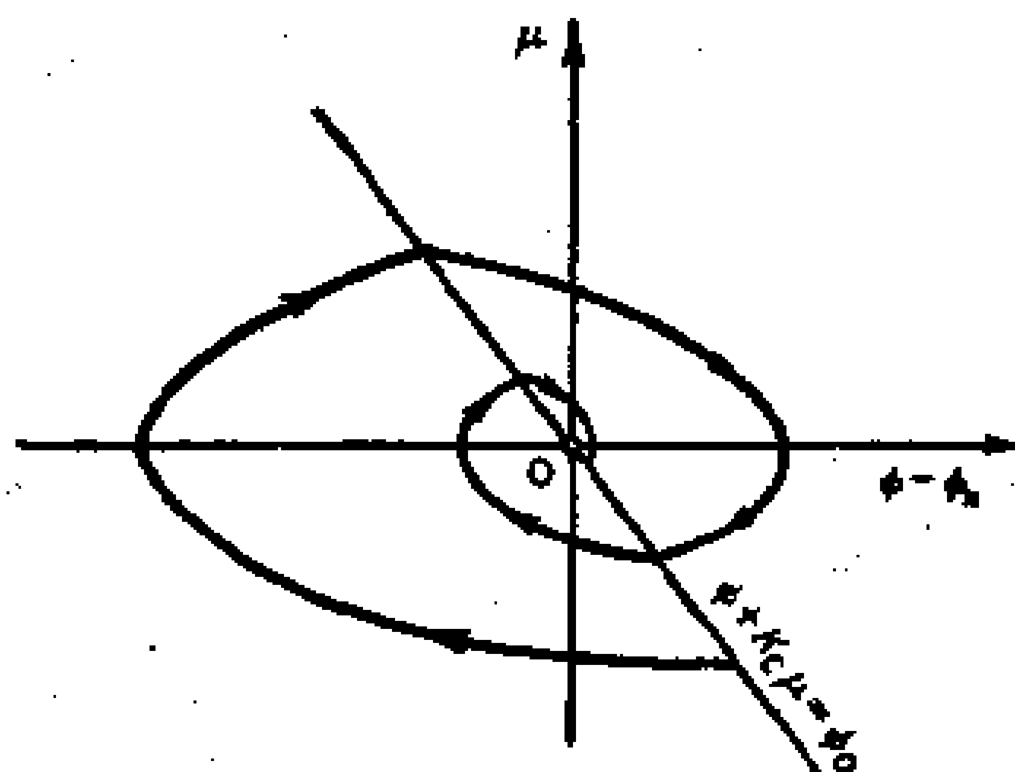


图 7.9． 引进与舵位相连的附加联结后同一系统的相图

7.4. 程序控制

读者大概已经注意到，在前几节里所考察的自动控制系统，是想解决第六章中列举的四种基本类型控制问题的一种，即稳定性问题或镇定问题。

第二个经常遇到的控制问题是，使一个被控系统的状态保持在状态 $X_0(t)$ 的周围，$X_0(t)$ 是一条预定的随时间而变化的规律，而不是把被控系统的状态保持在一个不变的（固定的）状态 $X_0=$ 常数的周围，就象在前面考察过的系统中那样。这是追随一个程序的控制问题。

应当指出，改变被控系统给定状态的程序，不仅可以作为一个时间函数而给出，也可以作为任何其他量的函数给出，只要这些量是随时间变化的。

支配给定状态变化的规律是预先知道的，所以关于它的信息可以安置在某种存储器 SU 里，这个存储器被连接到控制系统上，构成一个程序控制系统，如图 7.10 所示。

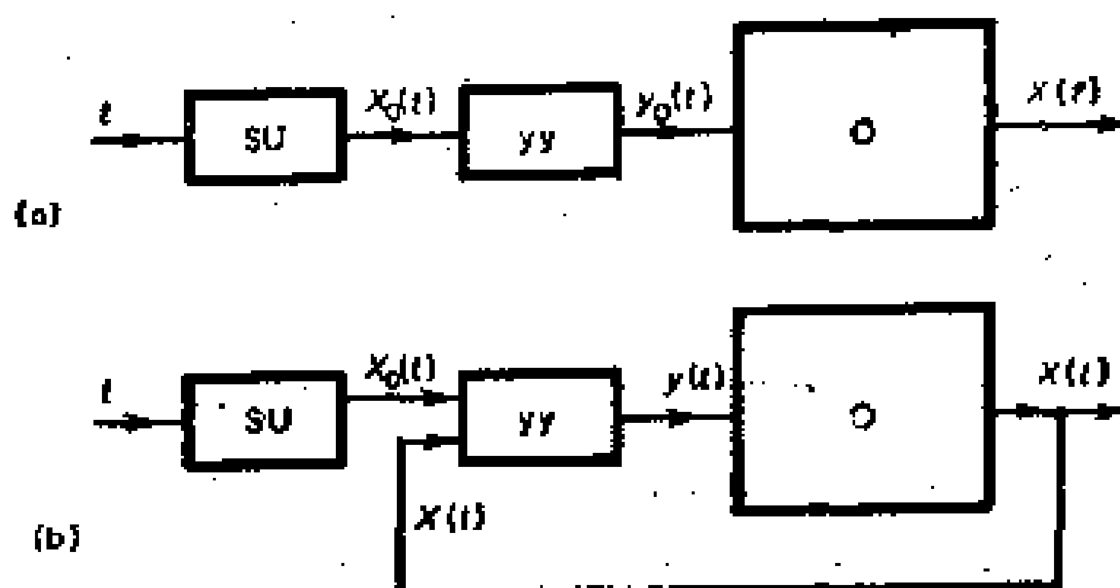


图 7.10. 程序控制系统的方框图

程序可以由一个开环控制系统（a）或闭环控制系统（b）来实现。

作为例子，让我们考察一个闭环程序控制系统——矿井卷扬机。这种系统的简图如图 7.11 所示。控制的任务是使升

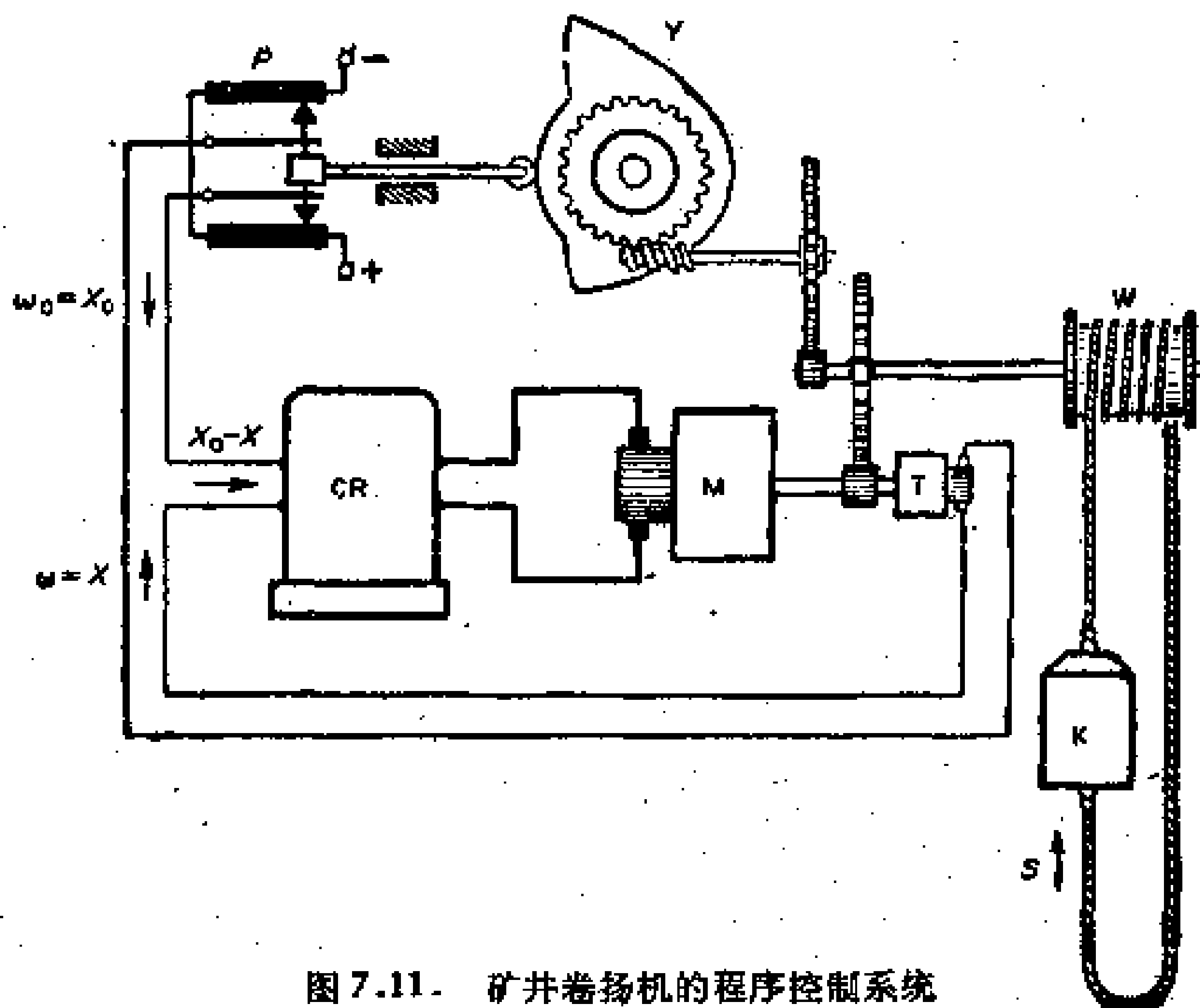


图 7.11. 矿井卷扬机的程序控制系统

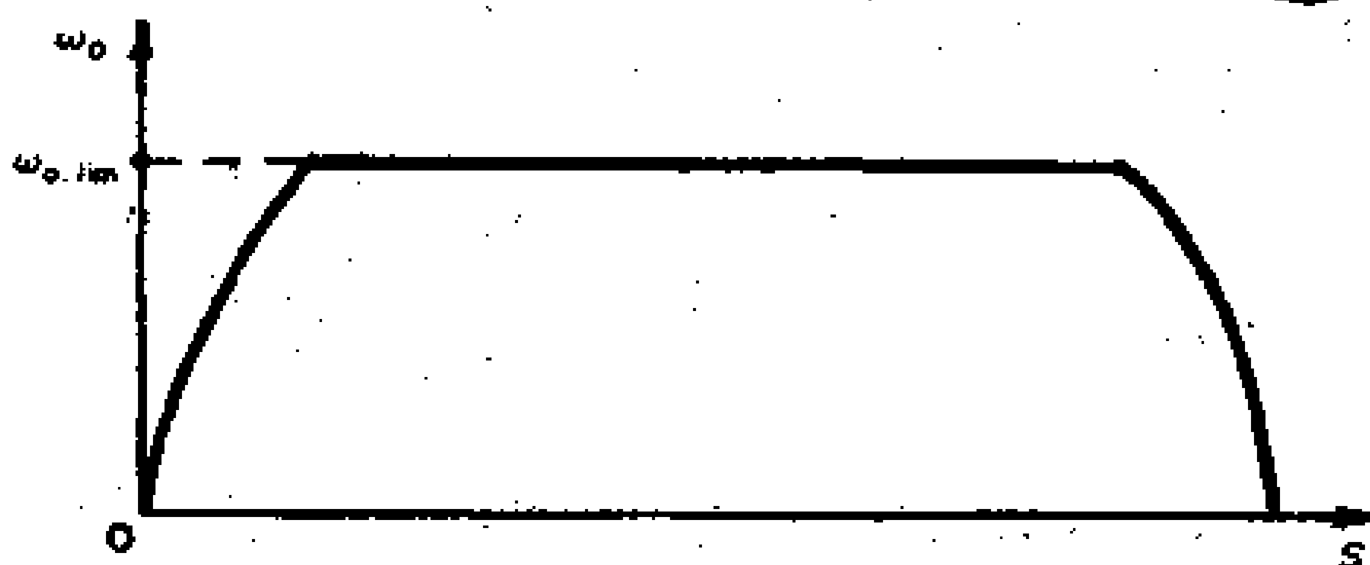


图 7.12. 升降车速度与其位置的依赖关系

降车K的速度ω_0，作为它的位置S的函数，符合一条给定的曲线(图 7.12)．曲线的形状是这样选定的，使升降车的速度尽可能快地达到极限许可值ω_{0lim}，然后当升降车到达接收平台时速度减小到零．

在图 7.11 所示的升降装置中，悬挂升降车K的绞盘W是由电动机M带动的，而电动机又是由被控整流器 CR 供电的．

被控整流器的输入是控制信号，这个控制信号是信号 X_0 与 X 的差，而 X_0 与 X 分别代表电动机(升降车)速度的预定值和实际值. 代表速度实际值的信号，是由连接在主动轴上的测速发电机 T 得到的. 与预定速度对应的信号是用电位计 P 形成的，P 的触点则由程序安置装置 Y 的专门凸轮带动. 凸轮的轮廓反映了所要求的升降车速度图线. 当升降车沿竖井运动时，凸轮就转动，并按程序改变预先安置好的速度值. 速度相对预定值的偏差值将改变被控整流器的输入信号，增加或减少，使得偏差缩小.

例如，根据这一原理工作的程序控制系统常被用到：热处理期间使金属温度按预定的温度图而变化；飞机自动着陆期间满足给定的高度变化规律；开动蒸汽锅炉期间保证压力按所需规律升高；机床按一条已知轮廓的程序加工零件；按一个程序来控制光学望远镜或射电望远镜的拖动装置，这个程序考虑到天体和地球的运动.

程序控制系统在自动控制工程中广泛地使用着. 按一个给定程序来控制某些过程，在自然界里也存在. 例如，活机体发育的控制，是按生殖细胞核里给出的程序进行的.

7.5. 随动系统

除了完成一个程序的问题以外，常发生下列情况：系统的预定状态随时间变化的规律，预先并不知道，而应当在实际控制过程中按某些外部信号来确定. 这就是跟踪问题. 如果控制系统，应该按一个预先不知道的、外来信号所表示的规律 $X_0(t)$，来改变被控系统的状态 $X(t)$，这个控制系统就叫做**跟踪随动系统**.

随动系统在工程中广泛地使用着：对跟踪飞机运动的雷达天线的拖动的控制，燃烧系统中的燃料-空气比的控制，超

重机拖动机构，等等。

象第 7.2 节中所考察的控制系统一样，在带有随动系统的控制装置中，校正信号也是根据从反馈通道传来的、关于被控对象状态的信息而产生的。

在随动系统中，控制任务是：被控量 $X(t)$ 应当复制外来信号产生的状态 $X_0(t)$ 的变化规律，所以对系统进行静力学研究将导致下列结论：最好尽可能地增大系统的传输系数 K，以降低跟踪误差的稳态值，如第 7.2 节已表明的那样。

由于校正作用变化后系统状态的变化不可避免地有时滞，系统的过渡状态对系统的性质就产生很大的影响，而且这种影响随着系统的传输系数 K 的增大而增大。图 7.13 表示对于各种 K 值来说，一个系统从初态到给定状态的过渡过程的典型图。可以看出，随着 K 的增大，振荡的衰减变慢了，对于某一个临界值 $K=K_{cr}$，系统的振荡将不消失，而对于

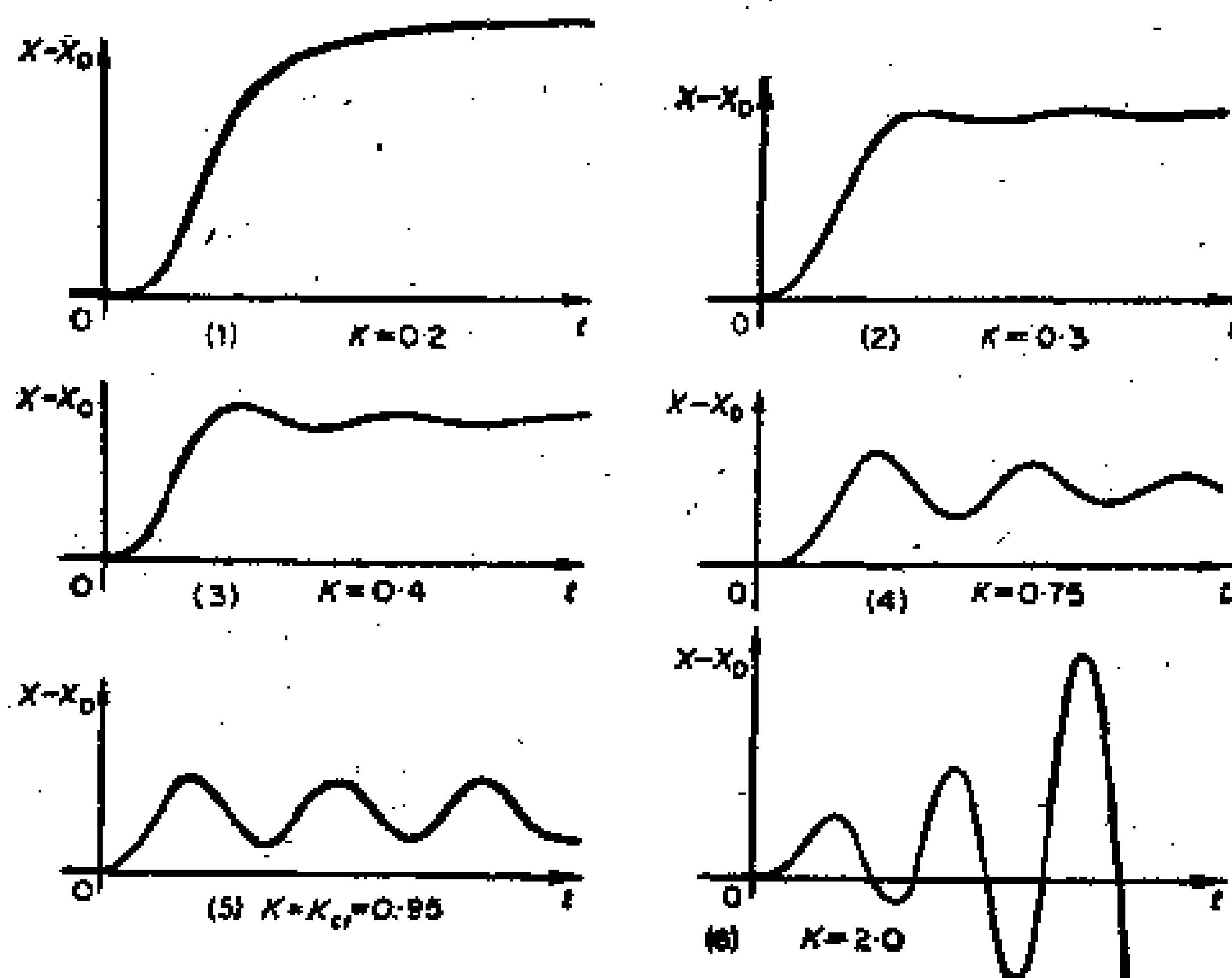


图 7.13. 传输系数 K 取不同值时系统的过渡过程

$K > K_{cr}$ 来说，系统就变成不稳定的了。

一个线性随动系统[1]的动态性质，可以从它的频率特性来判断。

设在系统的输入处加上一个这样的调节信号，它按正弦规律 $X_0(t) = X_{0a}\sin\omega t$ 而变化，这里 ω 是用每秒弧度计量的振荡频率。那么从过程开始经过一段足够长的时间后，就将在系统中建立起一个周期体制，而且输出值也将按具有同样频率 ω 的正弦规律而变化，但是振幅 X_a 将不同于给定输入的振幅 X_{0a}，而相位也相对该输入有一个移动 ϕ。

在图 7.14 中给出了一个例子，说明了在随动系统中由输入的正弦变化所造成的周期体制。

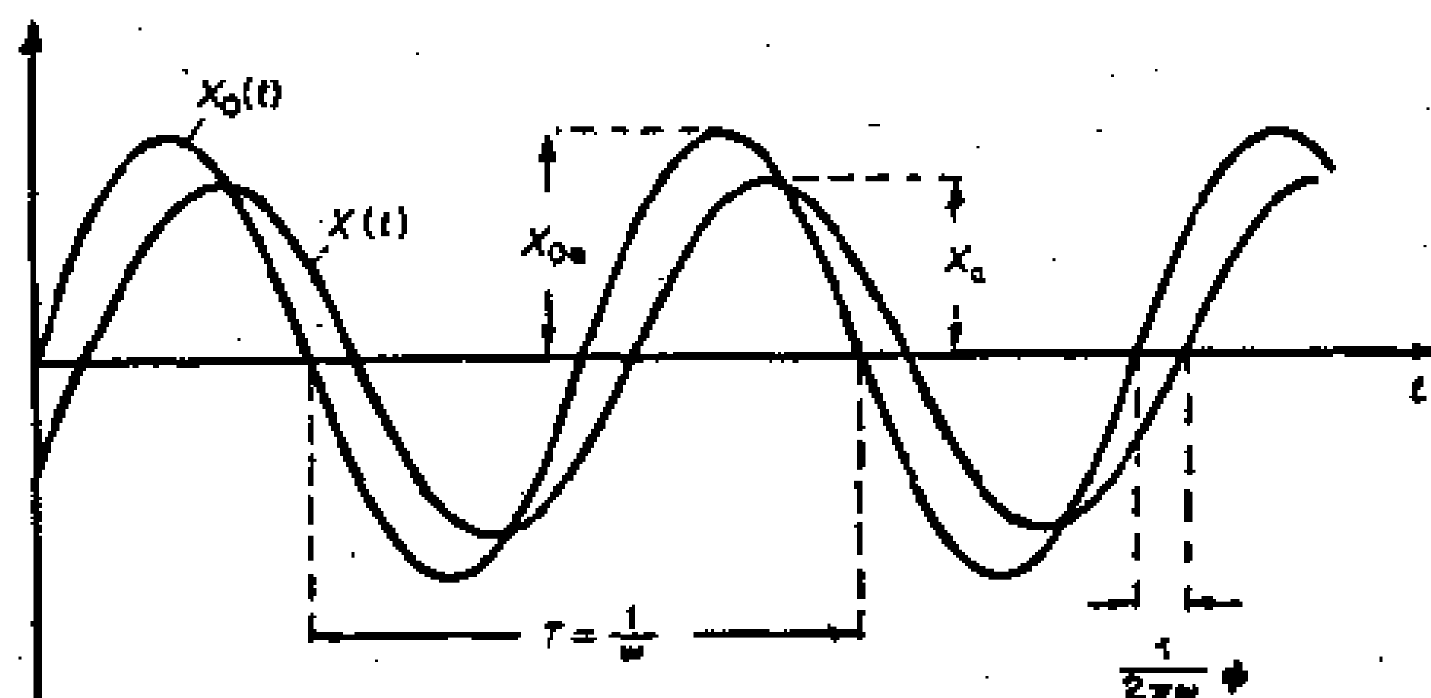


图 7.14. 随动系统的周期体制

如果对于各种频率 ω 重复这种实验，并每次都测出随动系统的输入和输出振荡间的振幅比 X_a/X_0 和相位差 ϕ，实验结果将使我们能画出系统的频率特性曲线，这就是幅频特性曲线 $X_a/X_{0a}(\omega)$ 和相频特性曲线 $\phi(\omega)$，在图 7.15 中给出了

---

1) 线性系统是可应用迭加原理的系统，即如果对于一个输入 $X_{1入}(t)$ 来说有一个输出 $X_{1出}(t)$ 与之对应，对于另一个输入 $X_{2入}(t)$ 来说有一个输出 $X_{2出}(t)$ 与之对应，那么输入之和 $X_{入}(t) = X_{1入}(t) + X_{2入}(t)$ 将产生输出 $X_{出}(t) = X_{1出}(t) + X_{2出}(t)$。

它们的例子。幅频特性曲线上最大值M的出现表明，在输入振荡的某一频率处出现了共振，这个频率接近于系统的共振频率。

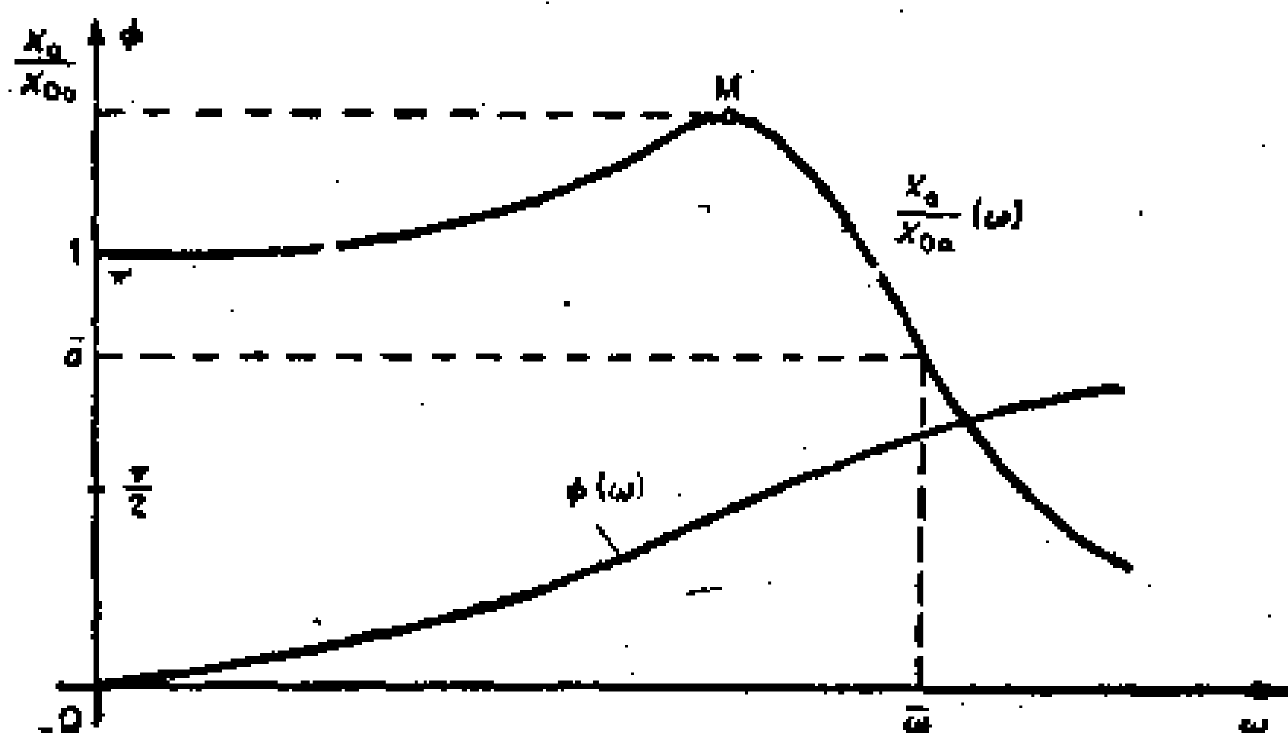


图 7.15. 随动系统的幅频特性曲线和相频特性曲线

共振峰越高，系统就越容易发生振荡，振荡的衰减也越慢。所以最好在幅频特性曲线上不出现高峰。

在高频范围内（ω 周围）振幅比 X_a/X_{0a} 的减小，意味着随动系统复制迅速变化信号的能力是不大的。如果假设振幅比 $X_a/X_{0a}<\bar{a}$ 是不允许的，那么在此条件下，在幅频特性曲线上可以区分出一个频率范围 $0-\bar{\omega}$，它叫做系统的通频带。通频带越宽，系统就可以越精确地复制迅速变化的信号。

相频特性曲线使我们能判断复制输入信号时的相位滞后。显然，相位滞后 ϕ 越小，复制的精度就越高。

如果分析指出随动系统的动态性质不符合要求，那么可以采取措施来改善它。为此可以采用所谓校正元件。这种元件产生输入值或输出值的变化率或变化速度、加速度信号，引用这些信号就可以改善控制装置的操作算法。使用这些手段，常常可以在一个宽阔的频率范围内，明显地改善复制随动系统的输入信号的精度。

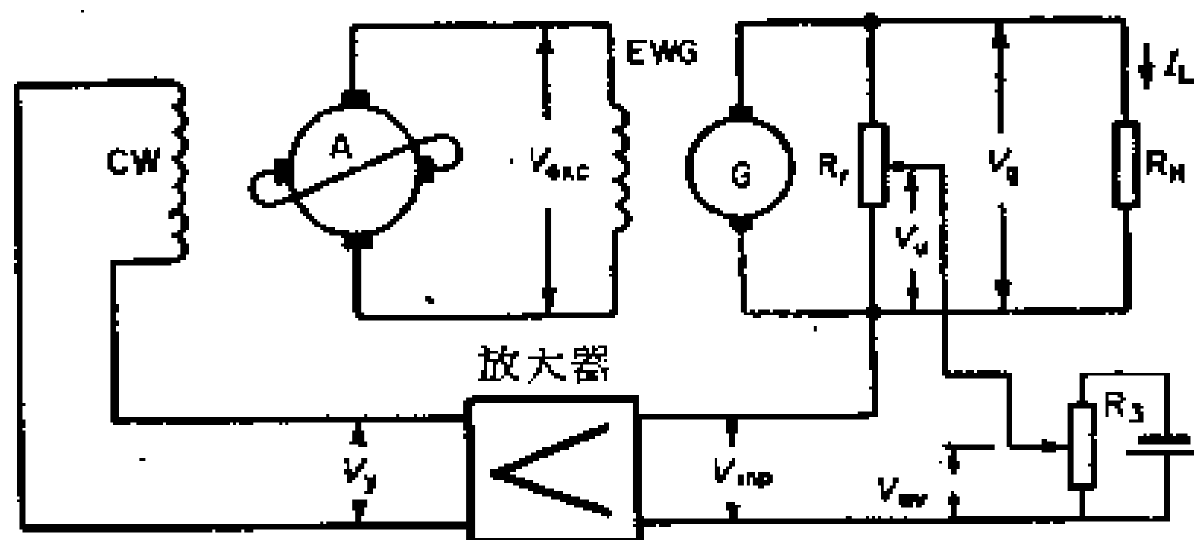


图 7.16. （第 1 题）

练习

1. 画出直流发电机的电压自动控制系统（图 7.16）的原理图，并给它的重要元件命名.

电路的工作情况如下．与被控量 V_g 成正比的电压 V_u 与电压标准 V_{av} 相比较，V_{av} 是操作者可以随意改变的．这两个电压之差被馈给一个电子放大器的输入，这个电子放大器馈电给电机放大机 A 的控制线圈 CW．电机放大机产生的直流电又馈给发电机的励磁线圈 EWG，其电流正比于控制线圈 CW 中的电压.

解：在把这个自动控制系统分解为它的功能元件时，我们首先分出发电机 G，把它看作被控对象．作用在发电机上的励磁电压 V_{exc} 是控制变量，而扰动是负载电流 I_L．被控制的量 V_g 被变换为测量元件的电压 V_u，并与电压 V_{av} 相比较．控制装置中的放大器是电子式的，我们将把自动同步机看作最后一级控制元件.

上述的分解是相对的，因为下列考虑同样是正当的：把电子放大器和自动同步机一起看作为放大器，发电机的励磁电路看作是最后一级控制元件，发电机的电枢当作被控对象．在上面所列举的电压控制系统的分解中，系统的各个功能元

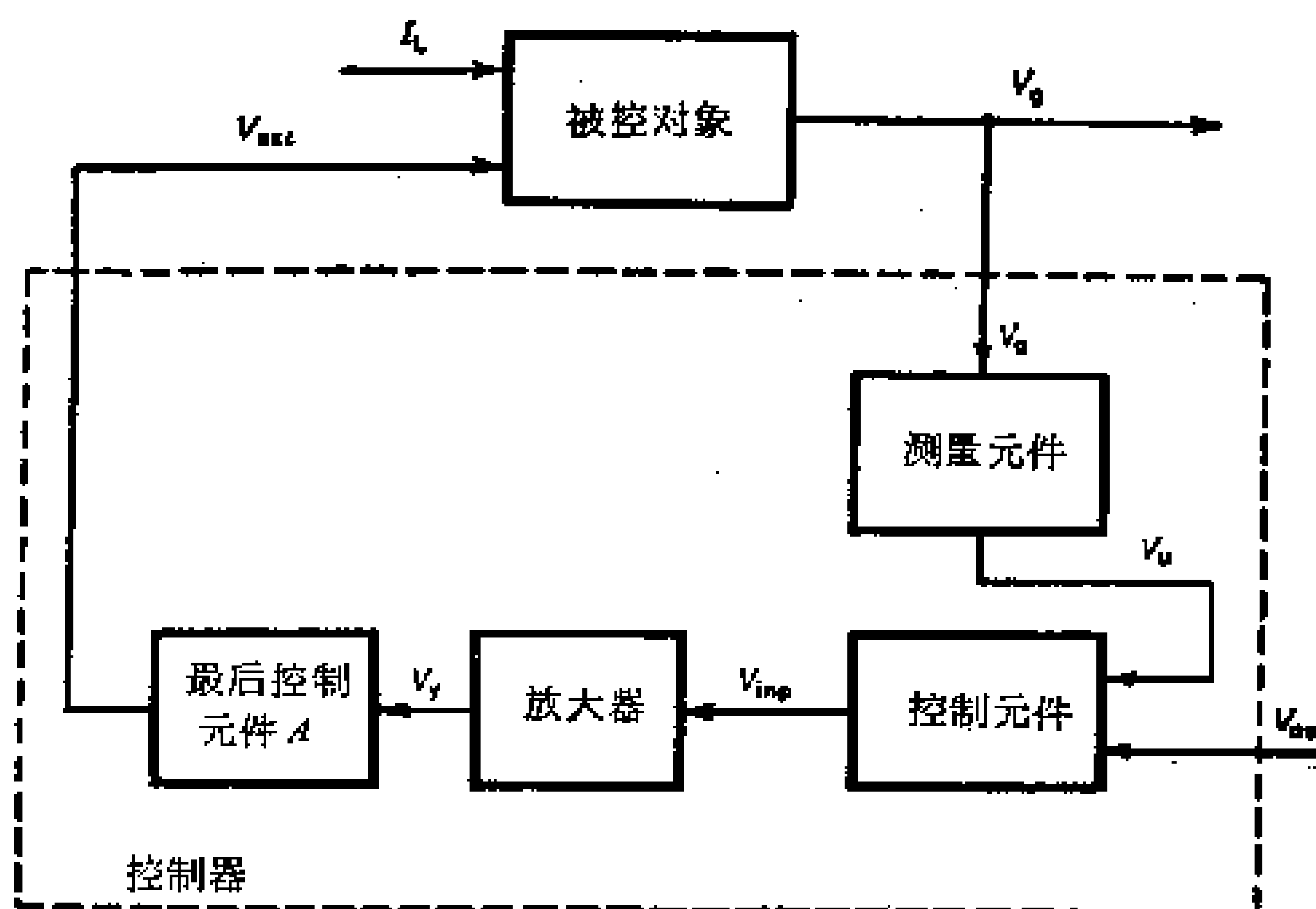


图 7.17. (第 1 题)

件可以表示如图 7.17.

2. 假设各元件是线性的(在一定范围内), 写出这个系统的静态特性的方程.

解: 这个系统的静态性质可以由下列方程组描写:

$$V = k_u V_g, \qquad (1)$$

$$V_{av} = k_u V_0, \qquad (2)$$

$$V_{inp} = k_c(V_{av} - V_u), \qquad (3)$$

$$V_Y = k_Y V_{inp}, \qquad (4)$$

$$V_{exc} = k_A V_Y, \qquad (5)$$

$$V_g = k_0 V - k_M I_L. \qquad (6)$$

把方程 (1)—(5) 的值代入方程 (6) 就得到系统的静态特性方程:

$$V_g = \frac{K V_0 - k_M I_L}{1 + K},$$

这里 $K = k_0 k_A k_Y k_c k_u$, V_0 是要求控制器保证的给定电压.

3. 图 7.18 表示一个控制液槽中液面的系统.

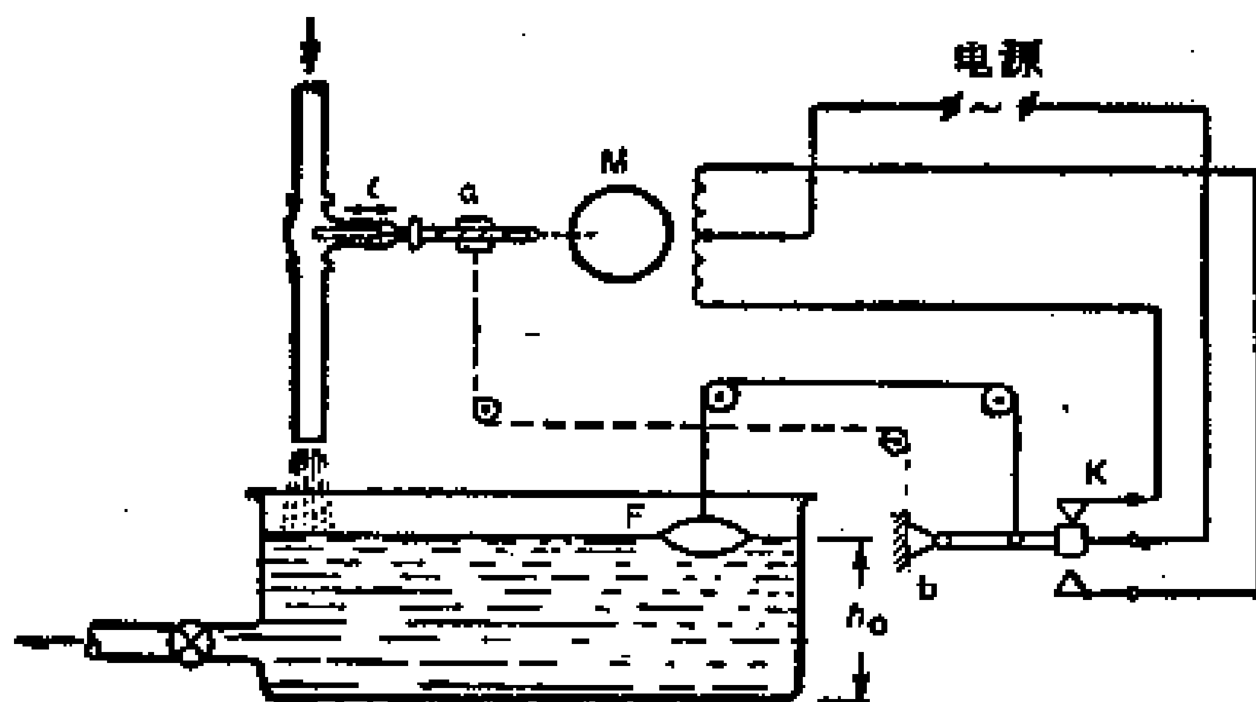


图 7.18. （第 3 题）

当液面变化时，浮子 F 就按下述方式拨动触点，使得可逆电动机 M 开启或关闭进料管中的控制阀 B，以补偿液面的变化。请在 h，l 平面上画出相轨迹，这里 h 是液槽中的液面，l 是进料管瓣门打开的大小（假设瓣门是这样设计的，使流进液槽的液量直接与 l 的值成正比）。这个系统将是稳定的吗？如果是稳定的，那么为什么？

解：这个系统的相轨迹画在图 7.19 上。相轨迹族的每条曲线都表示一条二次抛物线。由于抛物线相轨迹的对称性，代表点在通过了相平面的所有四个象限后，将总是回到初始位置。所以在这个系统中出现的被调量的振荡，将不会减弱，包围平衡点的相轨迹的封闭性可以证明这一点。

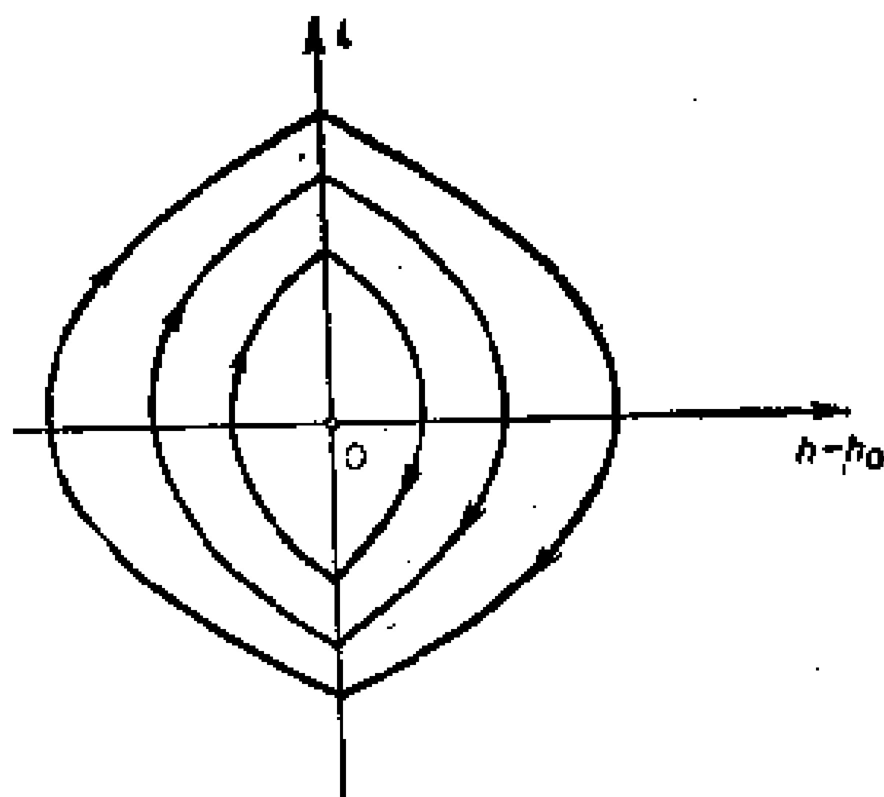


图 7.19. （第 3 题）

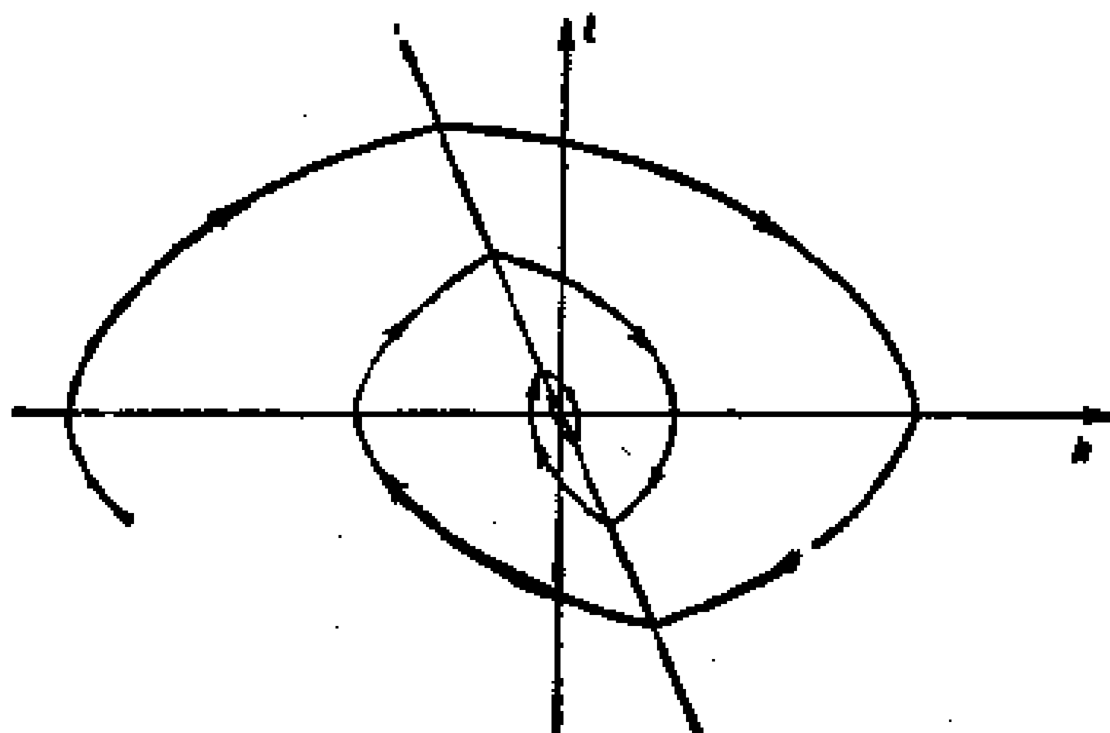


图 7.20. (第 4 题)

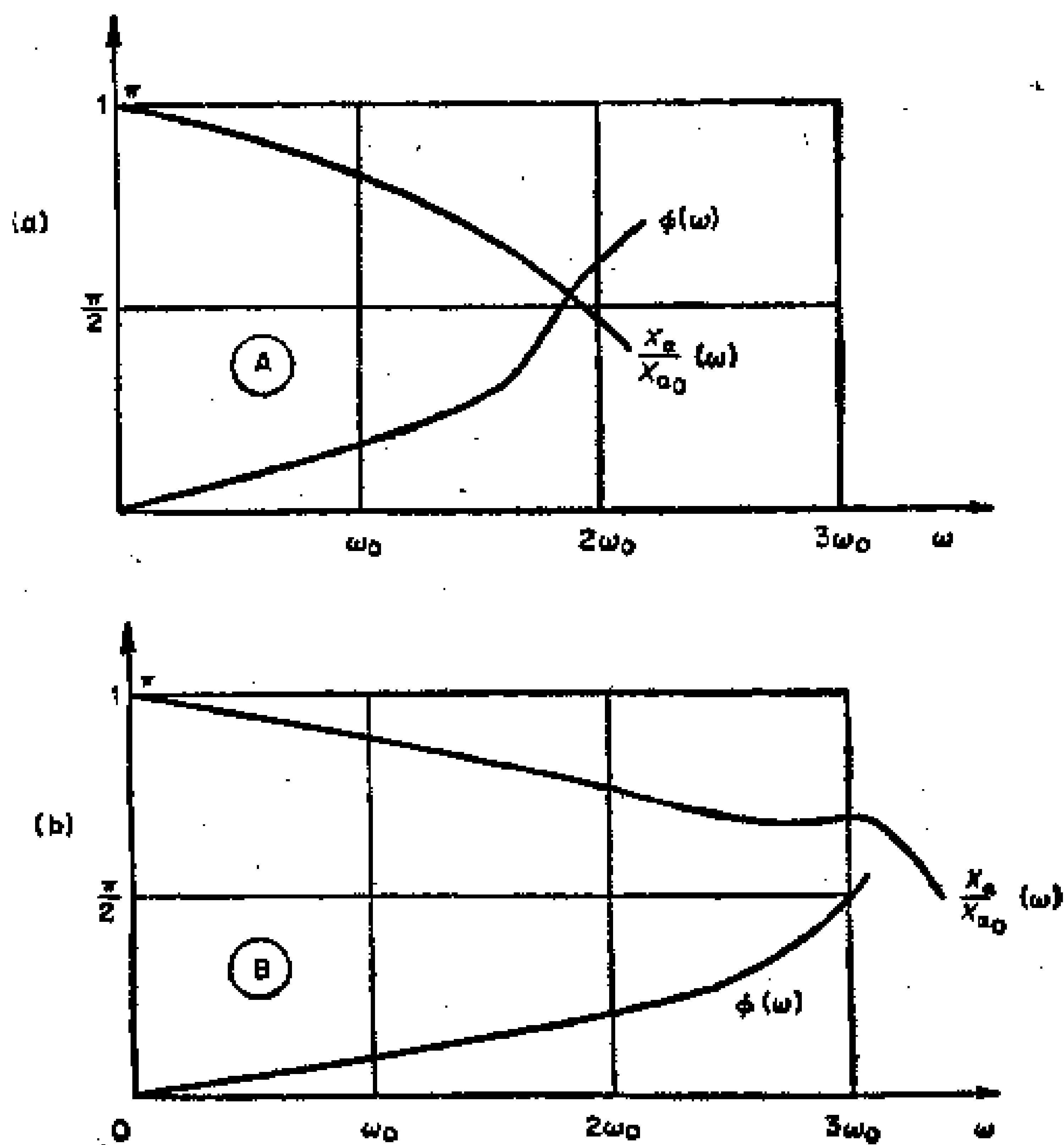


图 7.21. (第 6 题)

4. 怎样才能镇定这个系统？它的相图将是什么样子？

解：例如，引进一个内部负反馈，把被控器官的加力机构与浮子继电器的触点系统K，用机械联结起来，系统就可以被镇定了。在图7.18中用虚线画出了这个反馈(ab)。如果存在反馈，相轨迹就变为如图7.20所示。

5. 开关路灯的程序控制是个闭环系统吗？

解：不是。

6. 在图7.21(a)和(b)中，给出了两个控制系统A和B的幅频特性和相频特性。试从这些特性曲线判定哪一个系统中的过渡过程终止得快些。

解：在系统B中，过渡过程将较快地终止，因为这个系统有一个较宽的通频带和"较好的"(较平坦的)相频特性曲线。

第八章　最优控制

在第六章里已经说过，任何控制过程的任务，都是对需要控制的对象，施加主动的影响以"改善"它的行为．但是，为了把控制系统的种种行为加以比较，并发现"较好的"一个行为，就有必要选用一种合适的测度，这意味着需要一个表征控制的有效性的量——有效性判据 J．

根据系统的工作目的和工作条件的不同，不少量都可以作为有效性判据．例如，对于控制火车运动的系统来说，有效性判据可以是从起点站到终点站所化的时间 T；对于灌溉控制系统来说，有效性判据将是从灌溉过的田地里收获的得益 G．

每一个控制变量都对应着一个确定的有效性判据 J，最优控制的任务就在于找到和实现这样一个控制变量，关于这个变量，所选的判据将取最优值．在上述例子中，任务就是找到一个机车牵引力变化的程序，使得行驶时间最小，$J=T=$ 最小值；或者任务就是找到一个灌溉程序，按这个程序，从收获中将得到最大的利益，$J=G=$ 最大值．记住下面这一点是很重要的：被控变量只能在一定范围内变化，即不能超出一定的允许值范围．此外，可以对系统加上附加限制：对于相坐标的限制，对于控制算法的复杂性的限制，以及对于所用的信息容量的限制．

我们把最优控制理解为这样一组控制作用，它们满足加在系统上的限制，并将保证有效性判据取"最好"的值．

8.1. 最优过程

假设现在需要用控制作用（所操纵的变量）Y，来把系统状态从初始状态 X_{in} 变为给定状态 X_0。在相空间中，状态 X_{in} 和 X_0 对应于点 A_{in} 和 A_0，而系统从 A_{in} 到 A_0 的转移，将对应于连接这二点的某一条轨迹（图 8.1）。可以选出许多控制变量，它们都能满足下列要求：用所操纵的变量 Y 把系统的状态从 A_{in} 变到 A_0。所选出的每一个控制变量都对应于连接 A_{in} 和 A_0 的某一条轨迹．但是，就有效性判据 J 来说，这些轨迹并不是等价的，因为它们都对应于 J 的一个确定值 J_1，J_2，$\cdots$. 这时，求最优控制的问题，就可以作为下列问题来处理：从连接 A_{in} 和 A_0 的一切可能轨迹中，选择一条特殊轨迹，对于这条轨迹来说，有效性判据将最为有利。

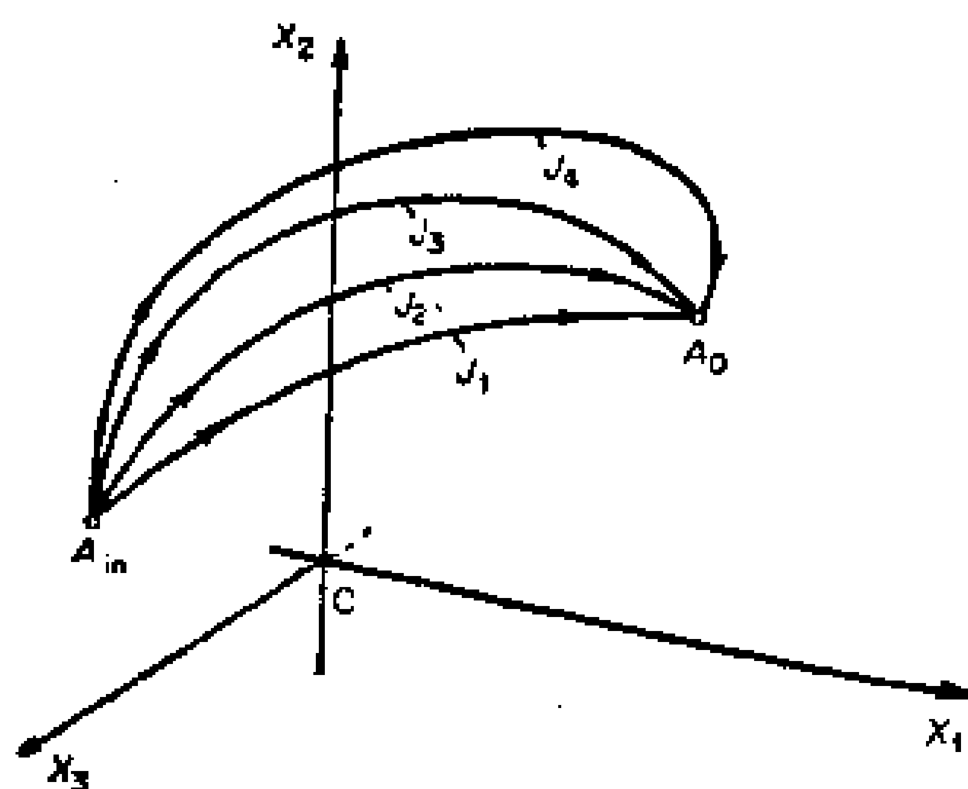


图 8.1. 系统从状态 A_{in} 转移到状态A_0 的一族可能轨迹

作为例子，我们考虑机车的最优控制问题：机车应当拉着列车在最短时间内，从一点 S_{in} 运动到另一点 S_0。在对可能控制的限制因素中，我们必须注意到下列事实，起动时的加速度和制动时的减速度 u，应当不超过一定的范围：

$$-\bar{u} < \bar{u} < +\bar{u}.$$

此外速度 v 不应超过最大允许速度 $\bar{v}$。

为了使列车能在最短的可能时间内从 S_{in} 行驶到 S_0，它的平均行驶速率就必须尽可能高。为此在开始时速度就必须尽可能快地增加，而这意味着车辆必须以最大允许加速度 u 加速。结果速度 v 将按线性规律

$$v = \bar{u}t$$

增加。

如果这个体制一直保持到列车到达 S_0 点的时刻，那么列车在到达时的速度就不为零。由于制动的强度总是有限的，要立即降低速度是不可能的，这样列车到达终点站时就会冲过目的地。

那么，为了使列车能停在预定目的地，就必须在系统达到 S_0 位置之前，适当地提前开始制动。制动越强，制动就可以开始得越迟些，这意味着平均行驶速率将更高。这也说明应当以最大允许加速度 $-\bar{u}$ 进行减速。

在以常值 $-\bar{u}$ 减速期间，速度将按线性规律

$$v = v_M - \bar{u}t$$

降低。

因此，列车从 S_{in} 到 S_0 的快速运动将由两个阶段组成：以极限加速度 $+\bar{u}$ 起动和以最大允许减速度 $-\bar{u}$ 制动。适当地选择加速持续时间 t_{acc} 和减速持续时间 t_{dec}，就可以出现这样的情况：在制动过程的终止时刻（当运动速度变为零时）列车将正好停在 S_0 点。

这种最优的运动方式——从行驶时间来看是最优的——如图 8.2 所示。

如果点 S_{in} 和 S_0 间的距离相当大，以致对这种运动方式来说，速度 v 将达到极限值 $\bar{v}$，那么最优运动显然还包括第三

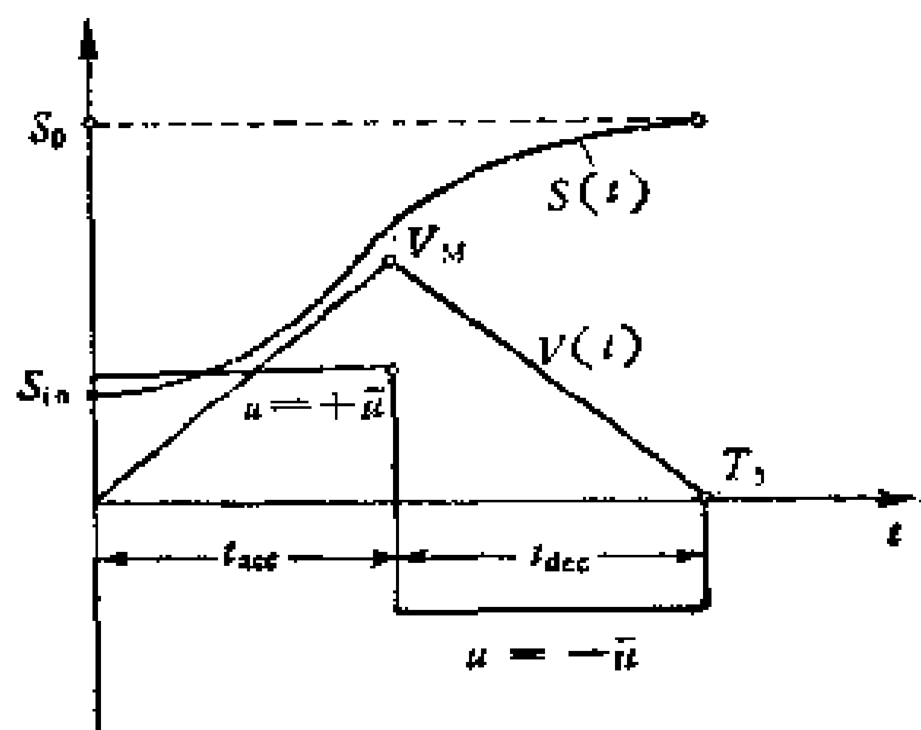


图 8.2. 加速度受到限制之列车的最优运动图

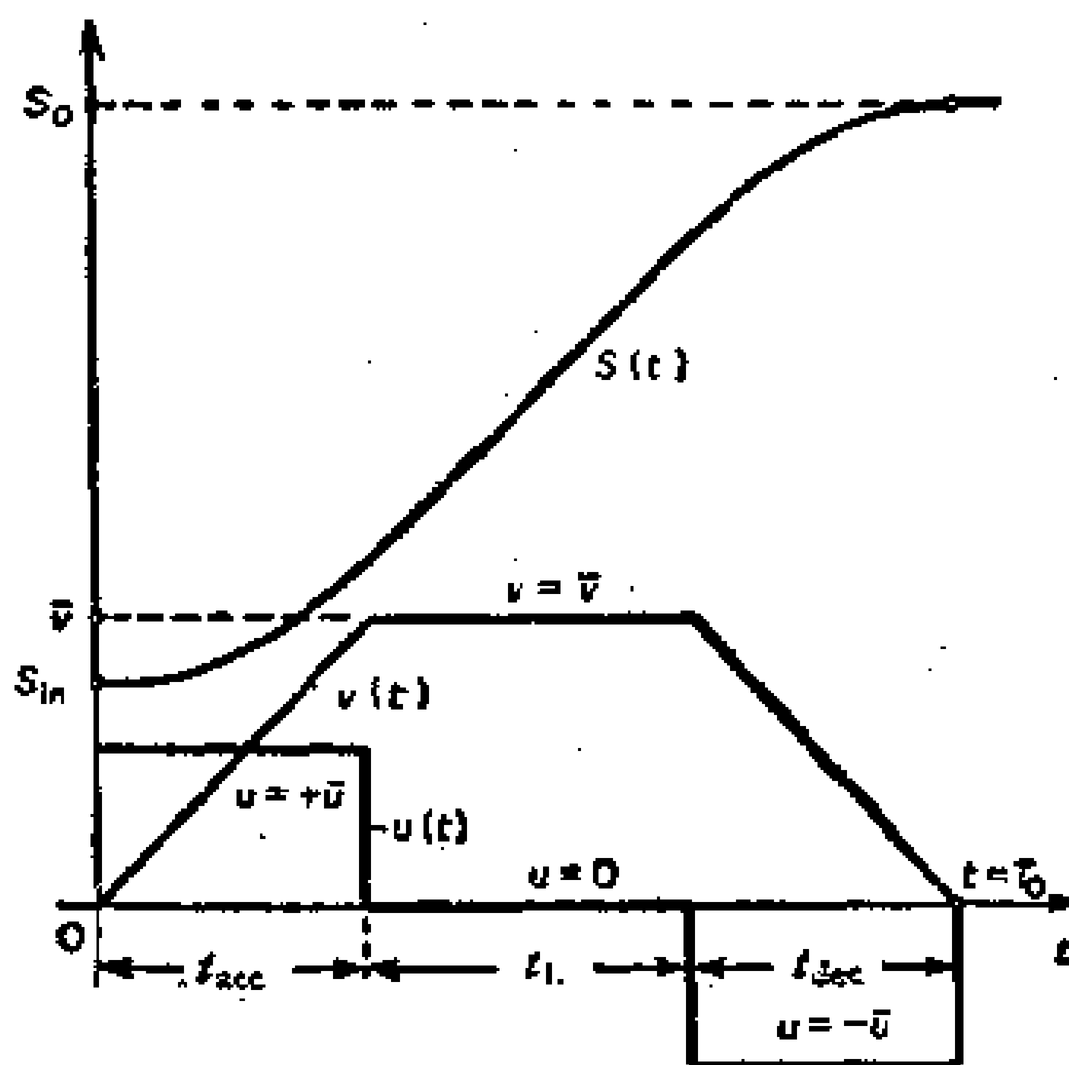


图 8.3. 同上图，但速度受到附加限制

段时间 t_L，在这段时间里列车将以允许的极限速度 $\bar{v}$ 匀速行驶，如图 8.3 所示。

在匀加速和匀减速期间，列车行驶的距离将按抛物线规律变化，而当列车以匀速运动时则将按线性规律变化。

如果我们现在把驱使列车加速或减速的作用当作控制作

用 Y，把行驶距离 S 当作输出值，那么容易看出，这个系统和第四章中考察过的液压拖动系统的运动规律是类似的.

所以这两个系统的相图也将类似，都表现为一族抛物线，它们的各参数是作为值 Y 的函数而变化的，如图 8.4 所示.

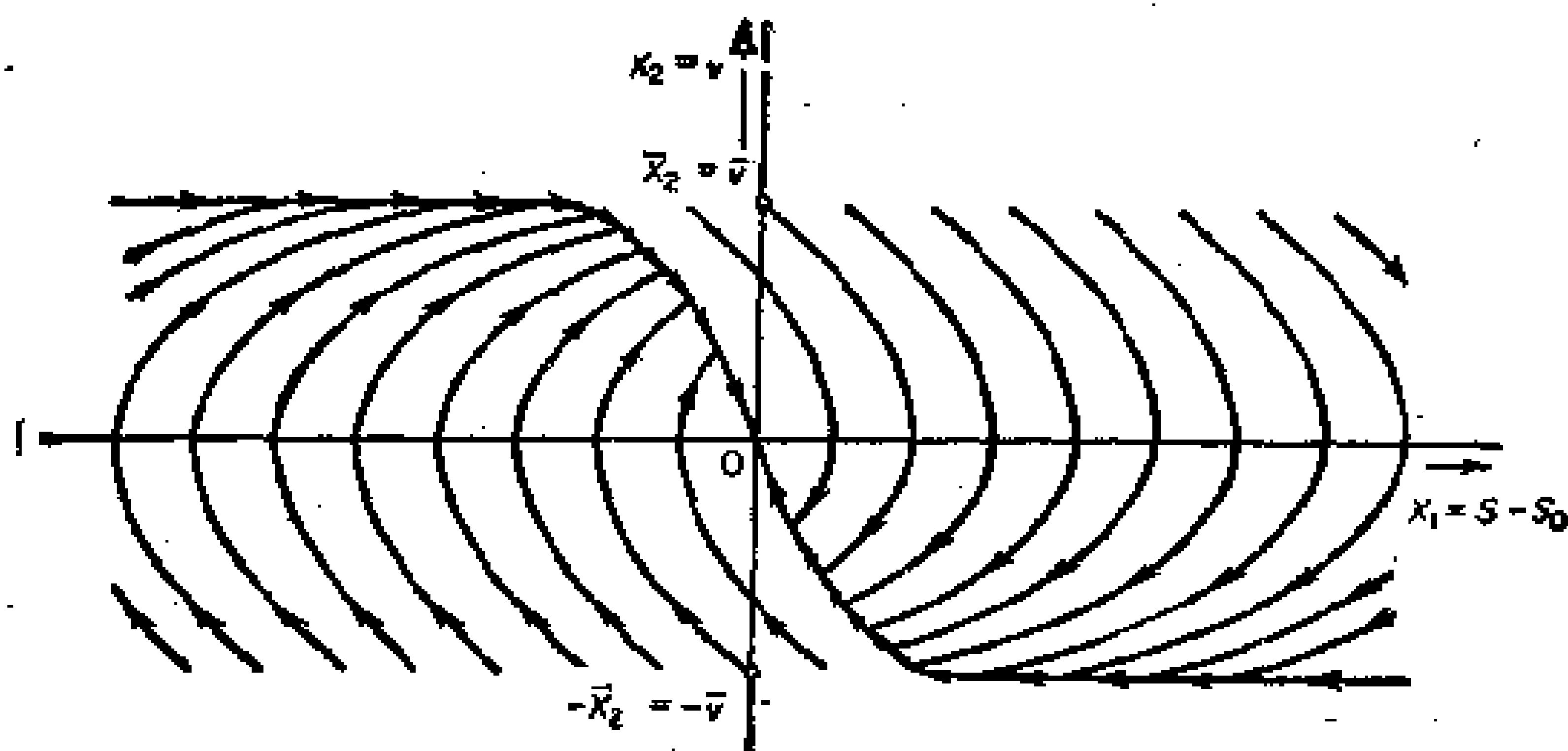


图 8.4. 最优转移轨迹族

根据上述考察，使用图 4.6 的相图，可以在相平面 $X_1 = S - S_0$，$X_2 = v$ 上，作出从所述系统的任一初态到任一给定状态的最优转移轨迹（图 8.4）. 对于任何系统，其输出量 X_1 的速度和加速度都受到限制，而控制的有效性判据是行驶时间，上述那个最优轨迹图，都是成立的.

8.2. 最优策略

最优控制的问题常常表现为这样的问题，对任一多级过程选择一个最优的解的序列. 例如在下列场合就产生这种问题：在制订对一家工厂长期投资计划时，我们试图选择这样一个逐年投资的序列，使得在一定的时期内，总的经济获益最大. 类似的问题发生在为生产现代化选择一个解序列的时候，这时我们的目的是，为了在一定时期内得到最大产量，同时还要把改造期内生产的损失考虑进去. 要解决求决策的最优策

略这种类型问题，可以应用已经为此而创立的数学方法：庞特里雅金（Л. С. Понтрягин）或贝尔曼（R. Bellman）的动态规划。

我们以经营养畜场为例，来考察建立多级决策的最优策略问题。

设有效性判据 J 是在 N 年期间销售牲畜的收益。用 Y_i 表示第 i 年末售出的牲畜数(从总数 X_i 中售出的)，用 C 表示每头牲畜的价格，不难看出，这个控制问题就是选择一个序列 $Y_1, Y_2, \cdots, Y_N$，使得有效性判据达到最大值

$$J = \sum_{i=1}^{i=N} CY_i = \text{最大值}. \tag{8.1}$$

显然，Y_i 只能在

$$0 \leqslant Y_i \leqslant X_i \tag{8.2}$$

这一范围内变化。

设在第 i 年初牲畜的总数是 X_{i-1}，在这年年底增加到 $X_i = kX_{i-1}$，那么在第 i 年底剩下要饲养的牲畜数将是

$$X_i^* = k(X_{i-1} - Y_{i-1}). \tag{8.3}$$

这时从下列事实可知最优策略是存在的，如果在第 i 年增加出售，那么在这一年的收入将增加，但是以后几年的收入将减少，因为牲畜数将增长得比较慢了。但是，如果出售的牲畜太少，那么每年对和式(8.1)的贡献将过少，也会达不到最优的有效性。显然，存在着一个最有利的最优策略，它使得在 N 年内的总收益最大，而我们要找的正是这种策略。

按动态规划的方法，我们将从最后一步开始，即选择值 Y_N。显然，第 N 年对和式(8.1)的最大贡献，将出现在我们选择 Y_N 的最大可能值的时候，按照(8.2)的限制，就得到 $Y_N = X_N$。对于前一年，第 $N-1$ 年，我们发现不管值 Y_{N-1} 是多少，第 $N-1$ 年的贡献将是 CY_{N-1} 元，而由于第 $N-1$ 年

出售牲畜而造成的第 N 年贡献的减少（考虑到每年的牲畜数是上一年的 k 倍）将是 kCY_{N-1} 元，它将对总值 J 有相反的效果。

对前面的每一年作类似的考虑，我们就得到下列结论：除了最后一年外，其他任何一年都不应当出售牲畜。于是这个例子的最优策略是：

$$\left.\begin{aligned} &Y_1 = 0, \\ &Y_2 = 0, \\ &\cdots \\ &Y_{N-1} = 0, \\ &Y_N = X_N. \end{aligned}\right\} \tag{8.4}$$

现在我们要阐明，如果对系统加上附加限制，最优策略就将明显地改变。例如，我们考虑到养畜场中牲畜不能超过 $\bar{X}$ 头：

$$X_t \leqslant \bar{X}. \tag{8.5}$$

这取决于可利用的场地、饲料等。那么使用类似于上面的计算，并从过程的末尾算到开头，我们就得到下列结论：最优策略就是使在最短的可能期间内，把牲畜数增长到极限值 $\bar{X}$，然后把它保持在这个水平上，直到最后一年，届时就应当把全部

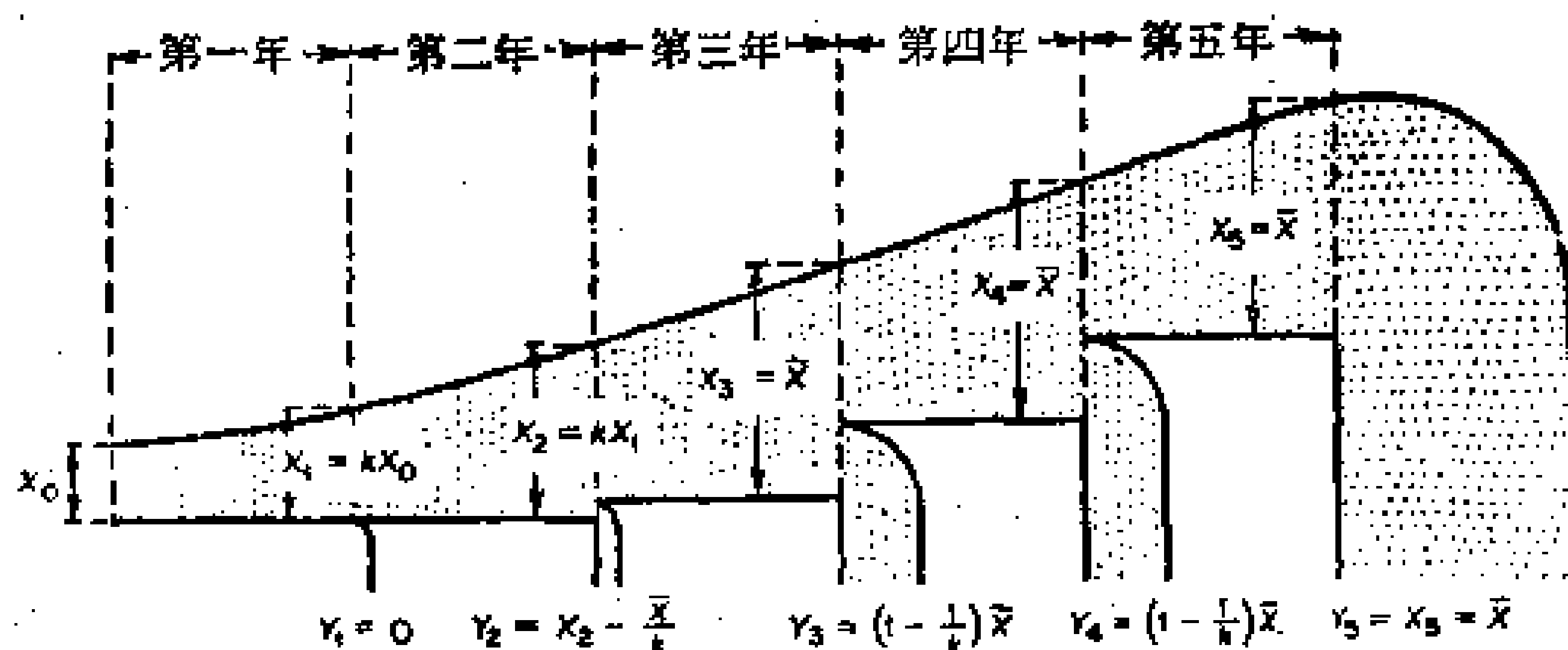


图 8.5. 养畜场的最优策略

牲畜都卖掉。对于 $N=5$ 来说的最优策略清楚地表示在图 8.5 中。

这个策略表现为下列 Y 值序列：

$$\left.\begin{aligned}
Y_1 &= 0,\\
Y_2 &= X_1 - \frac{\bar{X}}{k},\\
Y_3 &= \left(1-\frac{1}{k}\right)\bar{X},\\
Y_4 &= \left(1-\frac{1}{k}\right)\bar{X},\\
Y_5 &= X_5 = \bar{X}.
\end{aligned}\right\} \tag{8.6}$$

从所引的这些例子和对第 8.1 节中的描述的最优过程所作的考虑可以看出，在最优过程的任何时刻，系统都应当在它的极限处工作。

8.3. 等位面

在大多数情况中，找寻最优控制的任务是非常费事的。虽然已经建立了各式各样的实际问题的解决方法，但是这些方法的实际使用通常需要那样多的计算，以致在许多情况下甚至对于现代计算机来说，计算量也是太大了。但是如果不去寻求系统从初始状态到给定状态的最优转移轨迹，而通过在状态空间里建立一些区域的边界，每一边界上有效性判据具有一定数值，这样解决问题的话，计算是可以大大简化的。已经发现，用这样的方法也能够得到关于最优转移的必要数据。

例如，我们仅限于讨论以转移时间为有效性判据的一类问题，即从反应速度的观点看来为最优的一类系统。我们将考察被控量的速度和加速度受到约束的情况，就象第 8.1 节中考察的对列车进行最优控制时所做的那样。这种限制也出

现在起重机、随动系统、矿井升降机等许多其他情况的最优控制中。

我们将试图在相空间中标出一个范围，在这个范围内，从每个点都能以确定的有效性判据 $J=\bar{J}$ 到达定点 A_0。

为此我们假设，在初始时刻 $(t=0)$ 代表点处于位置 A_0，而时间是后退的，我们用这种办法去跟随代表点进入给定状态的运动"史"。可以这样想象，我们所观察的代表点的运动是记录在电影胶卷上的，而电影是倒着放映的。因为我们已经知道，最优运动出现在最大允许值上，所以我们将看到，这个条件对系统所有各阶段都成立。设点 A_0 处在相空间的坐标原点（相空间是以 S 和 v 为轴的平面），如图 8.6 所示。因为在这一点出现的最优转移，只能是以极限减速度 $\bar{u}$ 运动的(见图 8.4)，所以我们将认为，在"倒退"运动的第一阶段，在时间 T_1 内系统的加速度等于 u。代表点将沿轨迹 0—1 或 0—1* 到达点 1 或点 1*，见图 8.6。但是，系统可能不是在整个时间

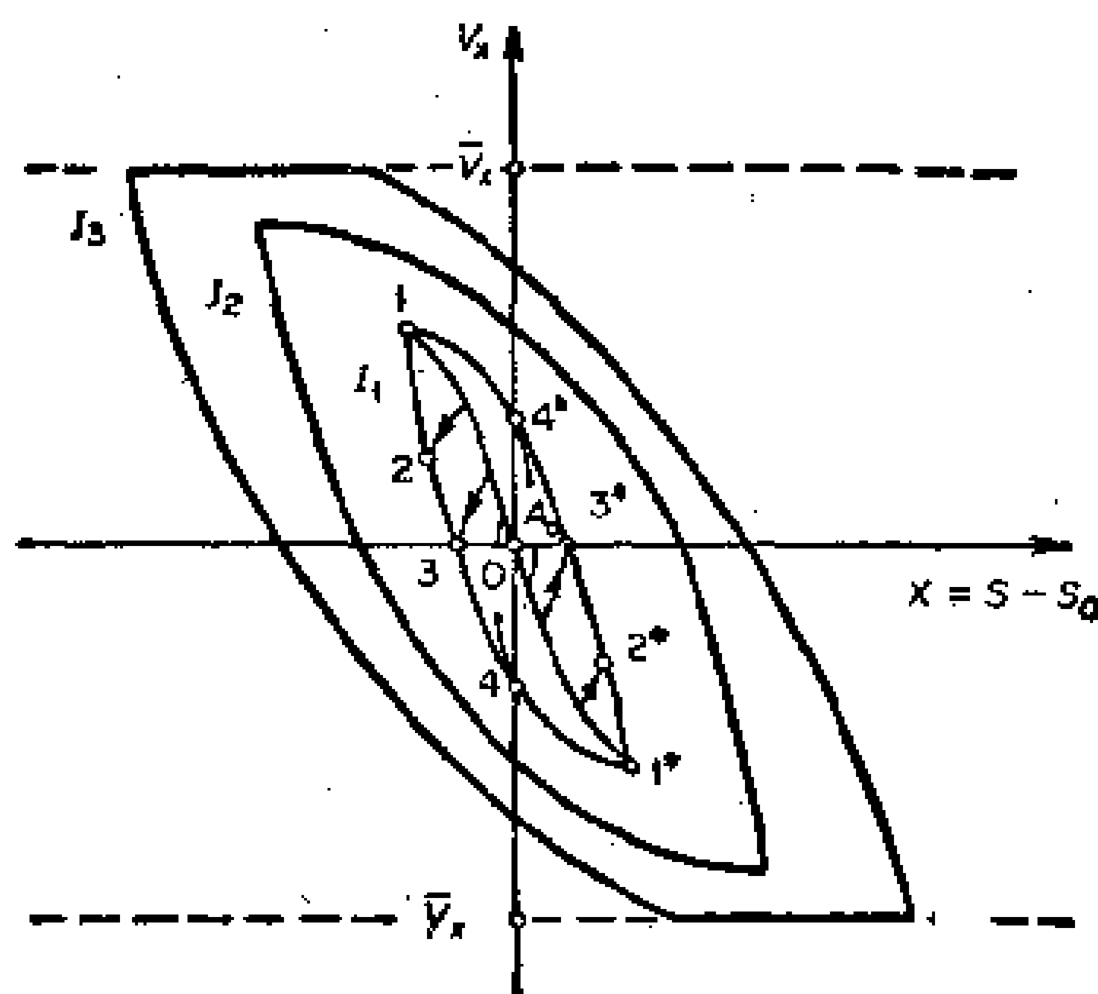


图 8.6. 等时区

T_1 内都以减速度 $\bar{u}$ 运动，而只是在一段时间 t_3 内才如此。在其余时间 $T_1 - t_3$ 内，系统可能是以极限加速度 $\bar{u}$ 运动的。

然后，把这一运动看作是在两段时间上发生的，这两段时间长的和为 T_1，而两段时间上运动分别具有加速度 $+\bar{u}$ 和 $-\bar{u}$，我们就求出在运动过程中代表点到达的点 2，2^*，3，3^*，…。画出足够多的这种点，我们就能以所需精度确定这些点所在的线 I_1，从而我们可以在时间 T_1 内沿着最优路径把这条线上的任何点导引到点 A_0。已经证明，可以把边界 I_1 内的任何点，在时间 T_1 内导引到点 A_0 而不违背加在系统上的限制，但是从边界 I_1 外的任何点出发，这种转移都是不可能的。边界 I_1 内的范围叫做极点 A_0 的具有转移时间 T_1 的等时区。

如果已知转移时间 $T_2 > T_1$，那么我们就可以绘制具有转移时间 T_2 的等时区的边界 I_2。 T 的值大到一定程度后，速度 $\bar{v}$ 的限制就显示出来了，这时等时区的边界就发生变形，这可以从图 8.6 中等时区 I_3 的形状看出。

在绘制等时区的边界时，每次将代表点引向边界时，就得出一个控制程序。显然，对于反向进行的时间来说，同一个程序也表示系统从边界上这一点到极点 A_0 的最优转移程序。所以，通过绘制等时区的边界，我们也找到了系统的最优控制过程的形式。

此外，通过绘制等时区的边界，还能使我们解决其他的最优控制问题。例如，对于系统的一个可能初态的给定区域 R_{in} 来说，可以作出一个包含可能初态 R_{in} 的区域 I_{in}，其上的响应时间为 T_{in}，见图 8.7。显然，如果整个 R_{in} 都在 I_{in} 里，那么从区域 R_{in} 的任何点出发，到极点的转移（极点是坐标系的原点）可以在时间 T_{in} 内完成。

显然可以作出其他的等位面，它们将在状态空间里划分出具有不同特征的区域，这些值不是时间 T 而是其他有效性

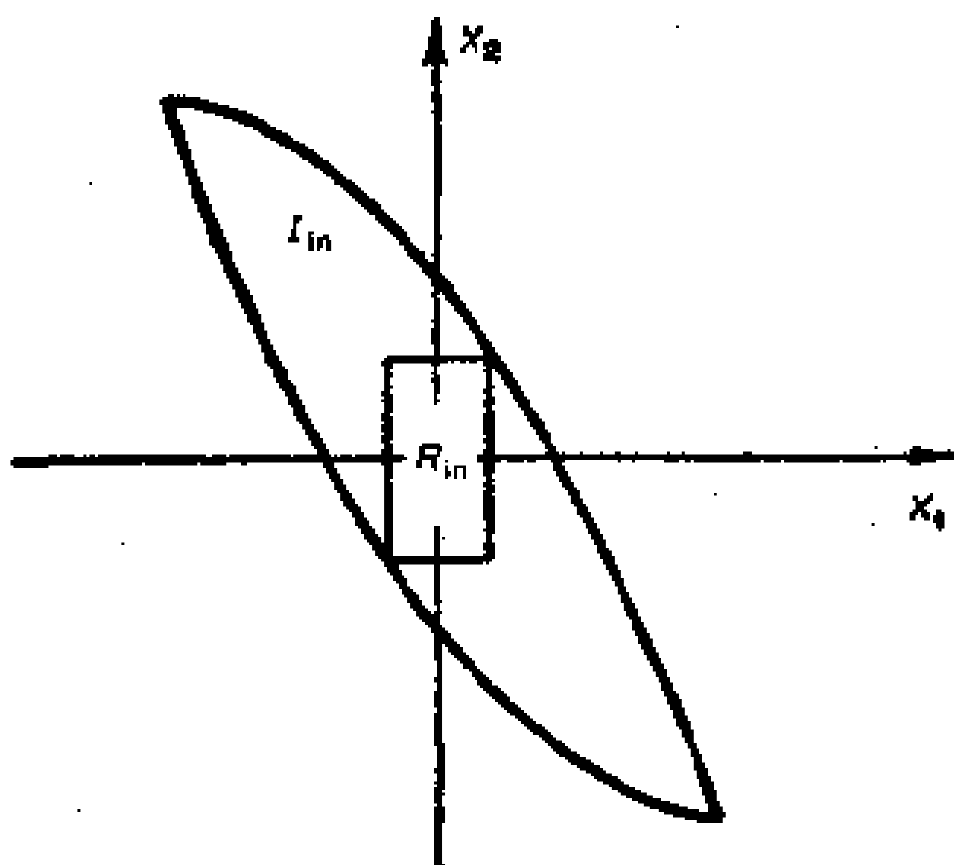


图 8.7. 由初态区 R_{in} 和等时区 I_{in} 来确定系统的响应快慢

判据 J 的值. 为了寻求最优控制，或确定系统从初态到给定状态的各种转移中 J 可以达到的极限，等位面方法也同样是有用的.

8.4. 最优控制系统

为了改善工程系统的技术指标和经济指标，需要自动地实现最优过程，对最优控制的规律所进行的研究，已经为此创造了条件. 最优控制系统正被用于快速随动系统，用于控制电气拖动装置的系统，动力工业，运输和火箭工程.

在实现最优控制系统时发生以下问题：应当如何选择控制装置的结构和参数，才能保证在系统的实际工作条件下运动是最优的，或至少接近最优的. 让我们看一下解决这种问题的一些方法.

如果系统工作时有几种固定的转移过程，那么代表系统状态的那个点，就应当从固定的初态出发，运动到那几个已知

的固定状态，这几种最优控制程序都可以预先选定，并把它们保存在控制装置的存储器里。 当必须应用某一种转移时，就把适当的程序从存储器里取出，并以控制作用的最优序列的形式付诸实现。这种控制系统被广泛用于控制载客货的电梯、挖凿机、可逆转台的电气拖动装置，以及电动车辆的起动和制动控制。

如果预先不知道系统所需要的转移，那么实现最优系统的问题就不能依靠固定的控制程序来解决，控制作用必须在系统的运行过程中产生。设我们要实现的控制系统，在第 8.1 节所述条件下，从反应速度的观点来看，它是控制火车的最优系统；或者液压拖动或其他任何系统，在它们的被控量的变化率和加速度上加有限制。在这些系统中，最优过程的集合如图 8.4 所示。从图 8.4 可以看出，为了实现从系统的任何初态到给定平衡状态的最优转移，必要而充分的条件是，控制作用应满足图 8.8 所示的规律。 在图 8.8 中，相空间被分为两部分 A

线所分开的两个区域的哪一个，将明确地确定出控制作用的值(所操纵变量的值)。

从最优过程集合的图，就可以确定开关线的位置和形状，因此也可以确定其方程。对于所考察的这类系统来说，从图 8.4 可见，在 X_1 值的范围里，开关线是由通过坐标系原点的两段抛物线所组成的。它们的方程可写为下列形式:

$$X_1 + CX_2^2 \operatorname{sgn} X_2 = 0, \tag{8.7}$$

这里系数 C 依赖于被控量 X_1 的极限加速度 $\bar{u}$，而 $\operatorname{sgn} X_2$ 这个记号表示 X_2 的这样一个函数，它的取值是

$$\operatorname{sgn} X_2 = \begin{cases} +1 & \text{当 } X_2 > 0 \text{ 时}, \\ -1 & \text{当 } X_2 < 0 \text{ 时}. \end{cases}$$

如果 X_1 和 X_2 的值使得代表系统状态的那一点不在开关线上，那么对于 A 区来说

$$X_1 + CX_2^2 \operatorname{sgn} X_2 < 0,$$

而对于 B 区来说

$$X_1 + CX_2^2 \operatorname{sgn} X_2 > 0.$$

从上所述，由控制装置产生的控制信号 u 必须取值

$$\left.\begin{array}{ll} u = +\bar{u}, & \text{如果 } X_1 + CX_2^2 \operatorname{sgn} X_2 < 0, \\ u = -\bar{u}, & \text{如果 } X_1 + CX_2^2 \operatorname{sgn} X_2 > 0. \end{array}\right\} \tag{8.8}$$

条件(8.8)表达了实现该类系统中的最优转移的控制算法。

实现这个算法可以借助于一个线性传感器 LT，一个非线性变换器 NC 和一个继电器校正元件 RCE，它们连接成一个如图 8.9 所示的线路。

这个线路的元件实现下列变换:

$$\left.\begin{array}{l} X_{c1} = kX_1, \\ X_{c2} = kCX_2^2 \operatorname{sgn} X_2, \\ u = -\bar{u} \operatorname{sgn}(X_{c1} + X_{c2}). \end{array}\right\} \tag{8.9}$$

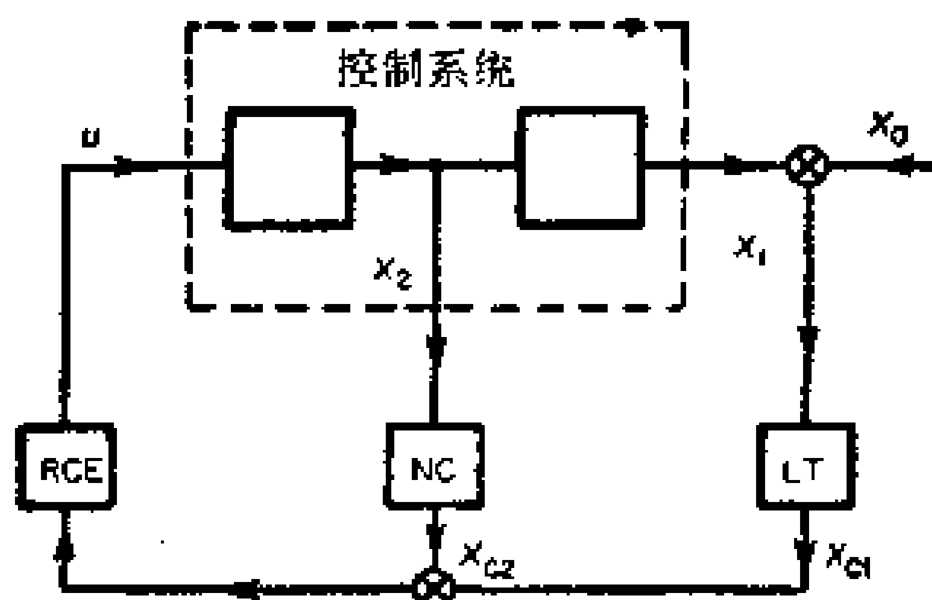


图 8.9. 实现最优控制算法的框图

容易看出，对于(8.9)所表示的变换器特性来说，图 8.9 所示的控制系统的控制装置将满足控制算法(8.8)。

为了对具有更复杂的装置和更复杂的有效性判据的系统实现最优控制，必然需要更复杂的控制装置。

练习

1. 一辆载煤的货车在站上用桥式起重机卸煤，从货车到堆煤站台的距离为 S，$S=30$ 米。起重机的最大运动速度是 $v=1$ 米/秒。运动开始时的最大加速度是 $u_1=0.2$ 米/秒²，运动结束时的减速度是 $u_2=0.4$ 米/秒²。试作出情况图，并计算控制参数，使得起重机从货车到堆煤站台的运动时间为最少。

解：图 8.10 表示起重机从 X_{in}（货车）到 X_k（堆煤点）的路线的最优控制。为了求出 t_1，t_2 和 t_3，我们写出起重机各段行程的运动方程：

$$S=\frac{u_1t_1^2}{2}+v_{max}\,t_2+\left(v_{max}\,t_3-\frac{u_2t_3^2}{2}\right),$$

$$30=\frac{0.2t_1^2}{2}+2t_2-\frac{0.4t_3^2}{2},$$

$$v_{max}=u_1t_1=0.2t_1\text{（对于加速的那一段），}$$

$$v_{max} = u_2 t_3 = 0.4 t_3$$（对于制动的那一段）。

从上述式子可以得到：

$$t_1 = \frac{v_{max}}{u_1} = 5 \text{ 秒}, \quad t_3 = \frac{v_{max}}{u_2} = 2.5 \text{ 秒},$$

$$t_2 = 14.375 \text{ 秒}.$$

2. 汽车 A（图 8.11）要从另外二辆汽车之间驶出停车场。

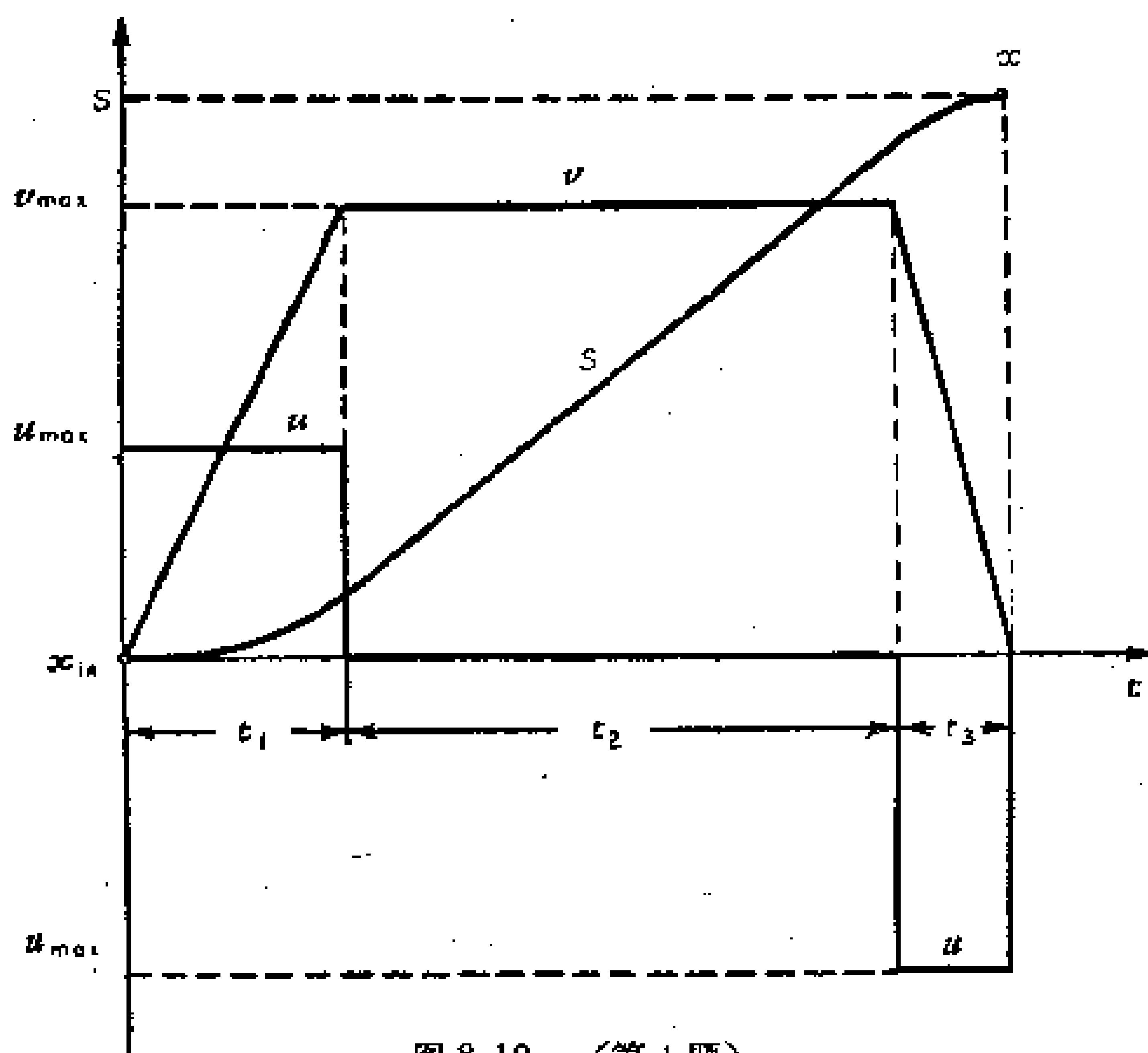


图 8.10. （第 1 题）

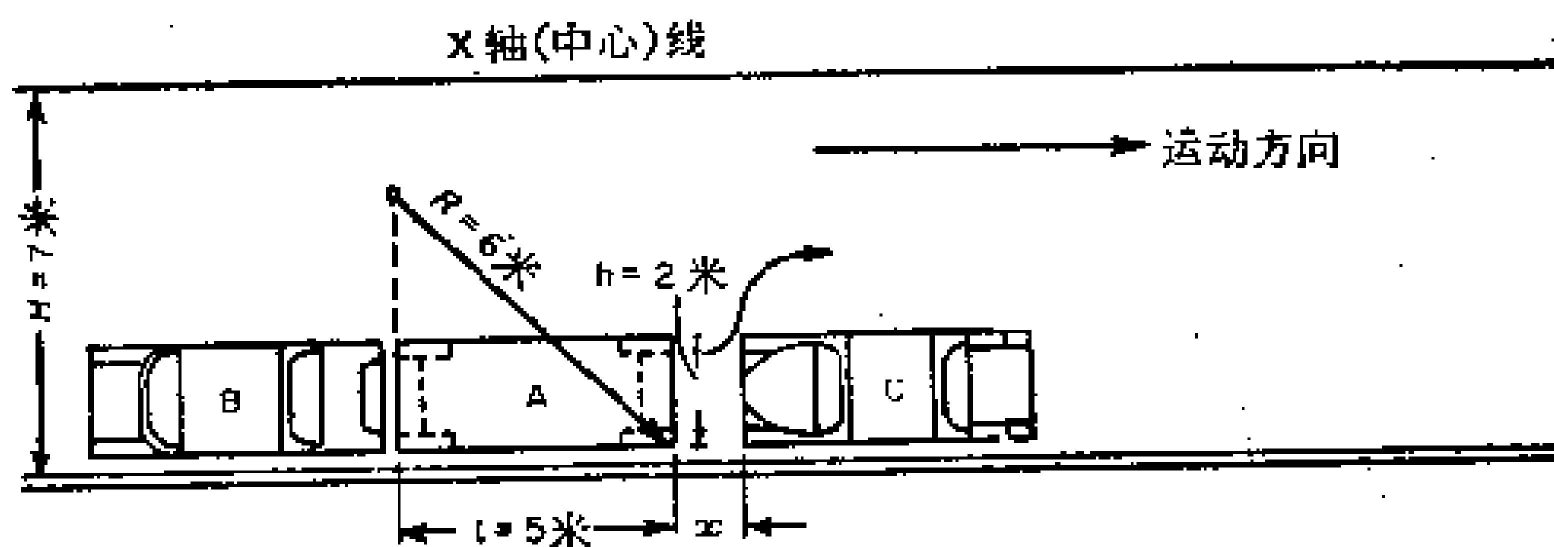


图 8.11. （第 2 题）

当它驶出时，不得穿过连续中心线．中心线离路边的距离是 $H=7$ 米．汽车A的宽 $h=2$ 米，长 $l=5$ 米，转弯半径 $R=6$ 米．如果这辆汽车不能倒退，试确定司机的最优操纵序列．求出能进行这种操纵时，汽车在B，C间的最小距离，以及右前轮的最优运动序列．

解：这辆汽车的运动略图如图 8.12 所示．最优控制是由下列方式得到的．汽车以车轮的最大可能转角从初始位置 1 向左运动到位置 2；这时 AB 边的位置在 A′B′．再向右转时，这辆汽车就运动到与正常运动平行的位置(位置 3)．汽车 A，C间的最小距离将由转弯半径 O_1D 确定，约为 1 米，这容易由几何作图定出．图 8.12 中的粗线表示右前轮的最优轨迹．

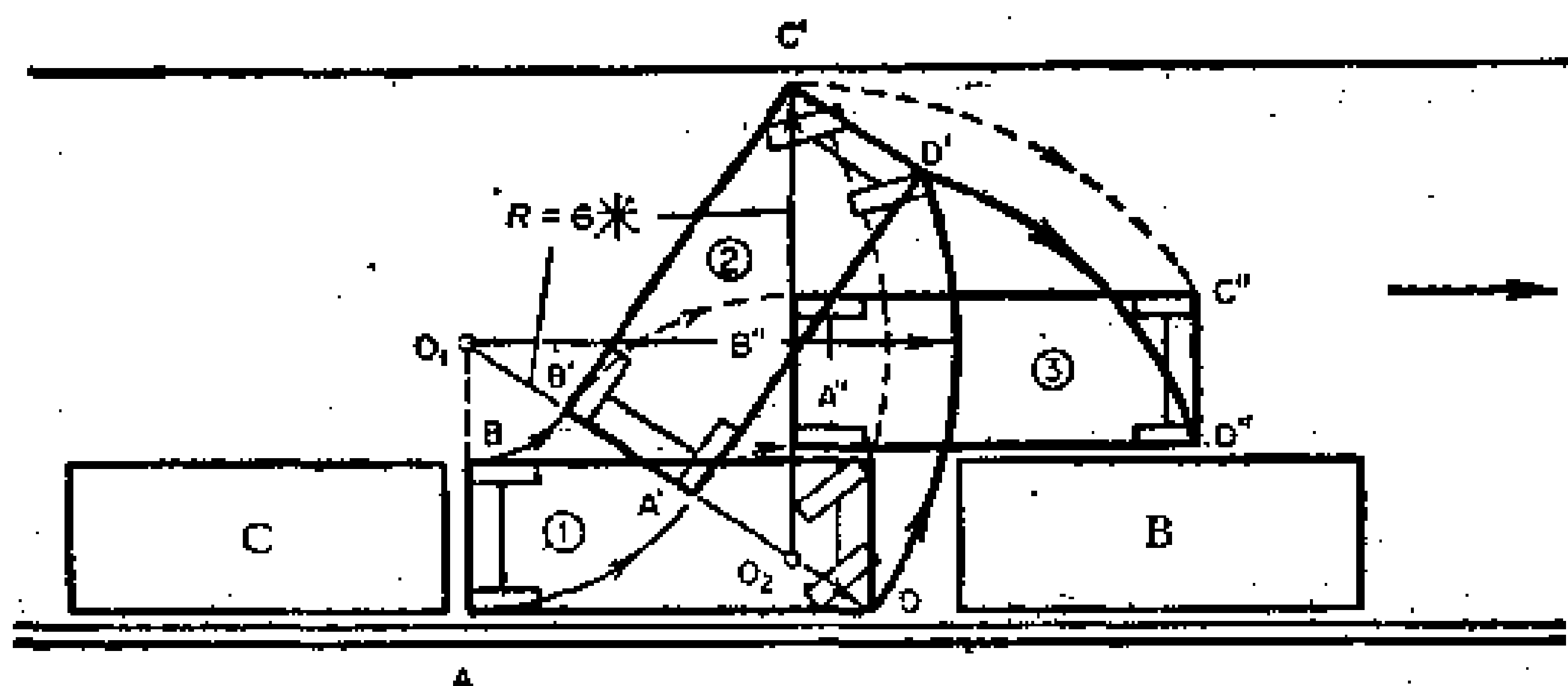


图 8.12．（第 2 题）

3. 图 8.13 是一个在第 4.2 节中描述过的二级液压拖动装置的方框图．这个装置含有两个无静差元件，传递系数为 $K_1=1$ 和 $K_2=3$．对坐标运动的限制由不等式 $|x_1|\leqslant\bar{x}_1=2$ 和 $|x_2|\leqslant\bar{x}_2=30$ 给出．

输出坐标的路径和速度对时间的依赖关系是：

(a) 对于速度未达到极限值的体制来说

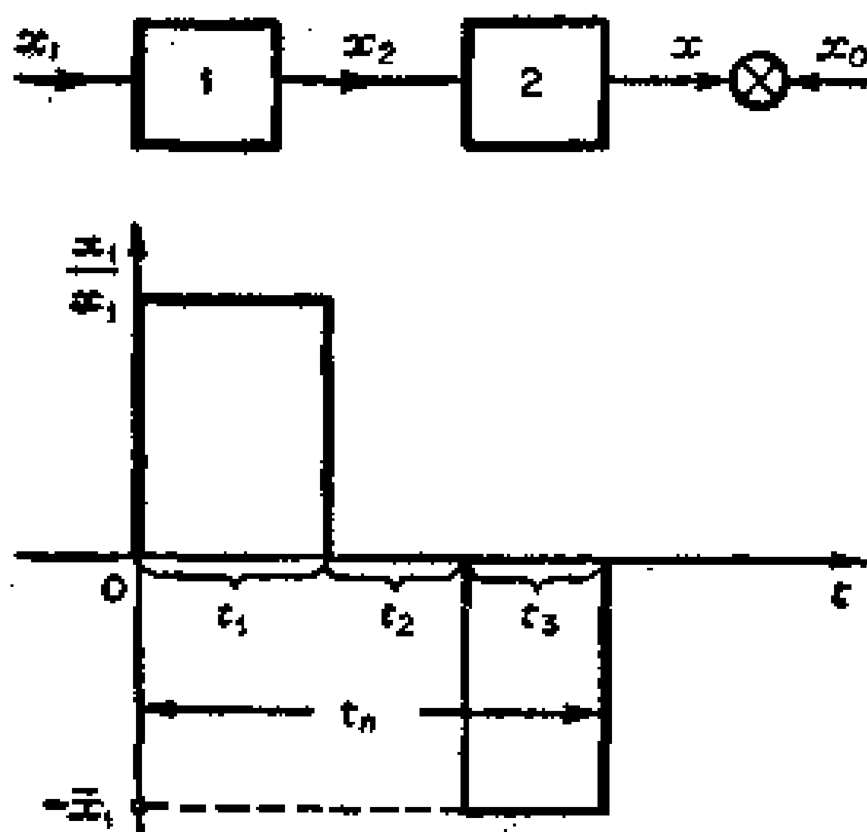


图 8.13. (第 3 题)

$$x = Nt_1^2 - \frac{1}{2}Nt_n^2, \quad v_x = Nt_n - 2Nt_1;$$

(b) 对于包括以极限速度运动的体制来说

$$x = \frac{1}{2}Nt_1^2 - Mt_n + \frac{1}{2}\frac{M^2}{N},$$

这里 $v_x = M - Nt$; $N = k_1k_2\bar{x}_1$; $M = k_2\bar{x}_2$.

试作出该系统的等时区的边界(极点位于坐标平面 x, v_x 的原点).

解: 为了作出等时区 I_1, I_2, I_3 的边界, 我们假设该过程的持续时间使得它们之和分别等于

$$t_1 + t_2 = t_l$$

或

$$t_1 + t_2 + t_3 = t_l.$$

那么,使用这两个关系,我们就得到建立等时区的计算公式:

(1) 未达到速度极限 ($N = 3 \cdot 1 \cdot 2 = 6$):

$$x = 6t^2 - 3t_l^2, \quad v_x = 6t_l - 12t_1;$$

(2) 达到速度极限（$M=1\cdot 30=30$）：

$$x=15t_l+15t_1-3t_1^2+15t_2;\quad v_x=30-6t_1.$$

根据这几个公式就可以画出如图 8.6 所示的曲线。

4. 设计师要设计一个多级宇宙火箭。火箭的开始重量 G 和宇宙舱重 g_k 是已知的。火箭具有 l 级。开始重量包括所有各级的重量和宇宙舱的重量，即 $G=\sum_{i=1}^{l}G_i+g_k$，这里 G_i 是第 i 级的重量。各级都有一个发动机，它们需要一定量的燃料。当某一级消耗完燃料后就被抛弃，而下一级就开始工作。在第 i 级的发动机工作期间，火箭获得附加速度 Δv_i，它依赖于这一级的重量和它们携带着的负载重量。

任务是求出在这 l 级之间的火箭重量的最优分布，使得在抛弃所有各级之后速度达到最大。

解：可以想象火箭的 l 级是加速的 l 级。在各级之前必须解决下列问题：应该把多少现存的重量（尚未抛弃的重量）化费在这一级上，把多少重量留给后面各级。

我们用 G_i 表示在第 i 级上抛弃的重量，用 $G_i^*=\sum_{k=i+1}^{l}G_k$ 来表示其余各级保留的重量。这时可以把第 i 级燃烧以后增加的速度写为这级重量和留剩重量的函数，同时考虑到宇宙舱的重量，即

$$\Delta v_i=f(G_i,\ G_i^*+g_k).$$

解决问题应当从最后一级开始，在前面几级已经抛弃后剩下的任何重量 G_{l-1}^* 必须完全给予第 l 级。最大速度增量将决定于 G_{l-1}^* 的已知值

$$\Delta v_l=f(G_{l-1}^*,\ g_k).$$

我们把第 $(l-1)$ 级后剩下的重量 G_{l-2}^* 固定下来，显然

$$G_{l-1}^*=G_{l-2}^*-G_{l-1}.$$

对第 $(l-1)$ 级的最优控制将使下面两个速度增量之和为最大：第 $(l-1)$ 级达到的 Δv_{l-1} 与第 l 级的最大增量 Δv_l. 选择最优控制的这个手续可以继续下去直到第一步。

在把第一步(选择第一级的重量 G_1)最优化之后，再一级级地计算下去，这时是从头开始，一直进行到结尾，结果确定了各级的最优重量的集合 $G_1, G_2, \cdots, G_l$, $\left(\sum_{i=1}^{l} G_i = G_0^*\right)$, 它给予有效负载(宇宙舱)以最大速度 Δv_{max}.

第九章　自　动　机

我们用"自动机"这个工程名词，来称呼由一些机构和装置组成的这样一种系统，在这种系统中，获取、变换、传输、利用能量(动力)、物质和信息的过程，可以不靠人的直接参与而实现其功能。这种系统的例子有，自动机床、自动打包机、自动照相印相机、自动售货机和许多其他机器。

但是在控制论中，"离散自动机"这一名词(或简称"自动机")，已经得到了承认并广泛地用来称呼一个要抽象得多的概念，即一个具有下列性质的模型：

(a) 于各个离散的时刻 $t_1, t_2, \cdots, t_m$，在模型的输入处，作用着输入值 $x_1, x_2, \cdots, x_m$，它们的每一个只能从输入字母表 X 中取有限个固定值；

(b) 在模型的输出处，可以观察到 n 个输出值 $y_1, y_2, \cdots, y_n$，它们的每一个都可以从输出字母表 Y 中取任意有限个固定值；

(c) 在每个时刻，模型可以处于状态 $z_1, z_2, \cdots, z_N$ 之一；

(d) 模型在每个时刻的状态，取决于这时的输入值 x 和前一时刻的状态 z；

(e) 模型根据它在前一时刻的状态，把在输入处的情况 $x = \{x_1, x_2, \cdots, x_m\}$ 变为在输出处的情况 $y = \{y_1, y_2, \cdots, y_n\}$。

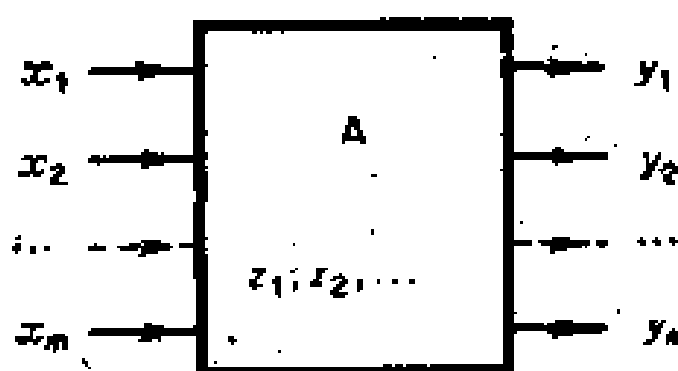


图 9.1. 离散自动机

用这种模型(图 9.1)来描写许多控制论系统是方便的。

如果在自动机输出处的情况 y，明确地由输入处的情况 x 所确定，那么这种自动机应归入无记忆自动机的类型．如果在自动机中，y 不仅依赖于给定时刻的 x 值，而且也依赖于模型的状态 z，z 又由 x 的前一时刻的值所决定，那么这种自动机就属于有限记忆自动机那一类型．

在第 9.3 节中将附带介绍无限记忆自动机这一术语．

在这一章中，我们将只限于考察较简单的离散自动机，这种自动机的输入与输出字母表只由两个符号组成：0 与 1．这样做是有道理的，因为正象在自动机理论中已经表明的那样，具有这种"贫乏的"字母表的自动机所能解决的问题，和具有任何别的复杂字母表的自动机是一样的．

离散自动机理论，或也常称为继电电路装置理论，在解决某些控制论的基本问题时是非常重要的，这些问题在涉及对控制论系统中的信息进行处理在原则上的可能性；离散自动机理论对于分析和综合复杂的继电电路和数字计算机来说，也是非常重要的．

9.1. 逻辑自动机

如果无记忆离散自动机的字母表中只有两个字母，那么它所实现的从输入到输出值的变换，就等价于形式逻辑中实行的变换．所以我们把这种自动机叫做逻辑自动机，并把描写逻辑自动机所完成的变换的函数叫做逻辑函数．在解决逻辑自动机的分析和设计问题时，所用的数学工具是逻辑代数．在历史上，这种代数的第一个例子，是英国数学家乔治·布尔（George Boole）于 1843 年发表的，结果这种代数就叫做布尔代数．

逻辑自动机的每个输出 y_i 都可以根据输入变量 x 的值取值 0 或 1．如果输入值有 m 个，而这些输入值都可以取 0 或

1，让我们来确定把 x 变为 y_i 的所有可能的逻辑函数的总数。为此我们把所有的输入值展开为序列 $x_1, x_2, \cdots, x_m$，并把它们看作二进制的数字。显然输入值的不同组合的个数 r，将等于不同的 r 位二进制数的个数，因此推出 $r=2^m$。但是，对输入的这 r 个情况的每一个，只能有 0 和 1 这两个输出值之一与之对应。所以有 m 个二进制输入的逻辑自动机，所有不同逻辑函数的总数 N 为

$$N = 2^r = 2^{2^m}. \tag{9.1}$$

逻辑函数都是由一些基本逻辑函数构成的。我们将使用三个基本逻辑函数：

（1）$\bar{x}$：x 的否定（读如“非 x”）。否定函数表示：如果 $x=1$，则 $\bar{x}=0$。而如果 $x=0$，则 $\bar{x}=1$。

（2）$x_1\&x_2$：逻辑乘或合取（读如“x_1 与 x_2”）。逻辑乘函数表示：仅当同时有 $x_1=1$ 与 $x_2=1$ 时它的结果等于 1；而在其他所有场合它等于 0。

（3）$x_1 \vee x_2$：逻辑加或析取（读如“x_1 或 x_2”）。逻辑加表示：仅当 $x_1=0$ 与 $x_2=0$ 时结果才等于 0；而在其他场合都等于 1。

逻辑函数可以用所谓“真值表”的形式给出，真值表中包含有自变量 x 的每一组合所对应的函数 y 的值（我们将省去下标 i），表 9.1 给出了两个自变量 x_1 和 x_2 的两种基本逻辑函数的值。这张表可以照表中各行来念：“如果 $x_1=\cdots$，$x_2=\cdots$，那么 x_1 与 $x_2=\cdots$，x_1 或 $x_2=\cdots$。”

表 9.1

x_1	x_2	x_1x_2	$x_1 \vee x_2$
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	1

逻辑函数被广泛地用于神经网络理论中，在研究脑和信息加工时，逻辑函数也是其所用数学工具之一。这两个问题

将在第 16 章中讨论。

利用基本逻辑函数，可以构造进一步的逻辑函数，以描述包括继电电路在内的各种逻辑自动机的性质。继电电路的元件是继电器，其输入是绕组(图 9.2)，输出是两种类型的触点：常开触点(绕组中没有电流时断开，有电流时闭合)和常闭触点(绕组中没有电流时闭合，有电流时断开)。在继电电路中，继电器元件的方便符号如图 9.2(b) 所示。

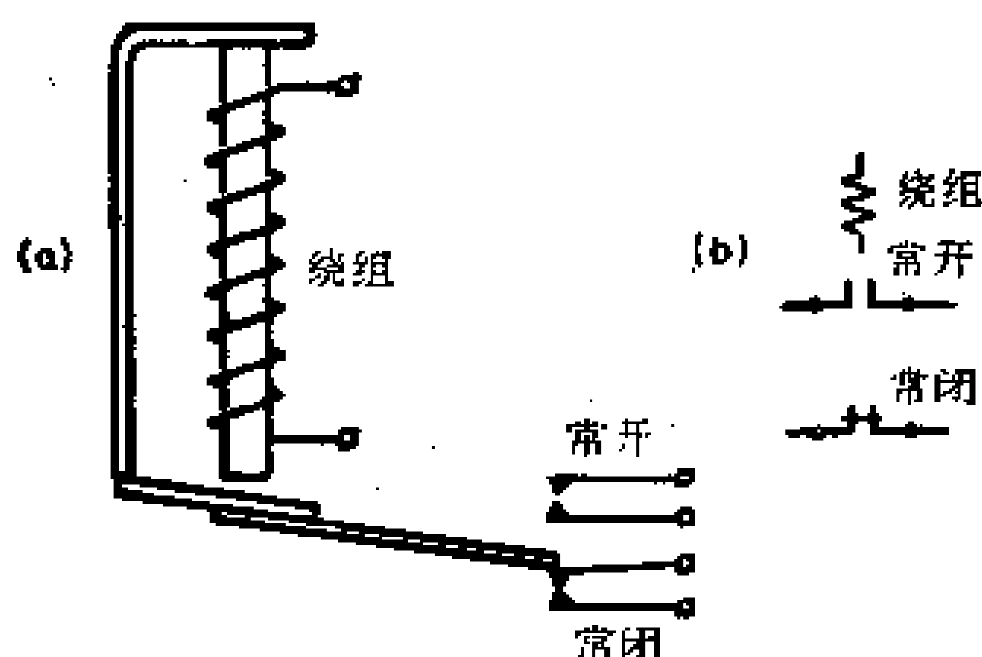


图 9.2. 继电电路的元件

我们将假设，继电器绕组中的电流和触点的状态是可以取值 0 或 1 的逻辑变量。表征同一继电器状态的逻辑变量将用同样的符号和下标来表示。例如，如果第 i 个继电器的绕组状态标为 x_i，那么它的常开触点的状态也将记为 x_i，而常闭触点的状态则记为 $\bar{x}_i$。

图 9.3 表示这样的继电电路，它们执行的变换对应于下列基本逻辑函数：图 9.3(a)——否定；图 9.3(b)——逻辑乘；图 9.3(c)——逻辑和。

使用继电器理论的方法，可以设计出这样的继电电路，它们能实现所要求的逻辑函数。

例如，必须构造这样一个继电电路，使它的变换函数 y

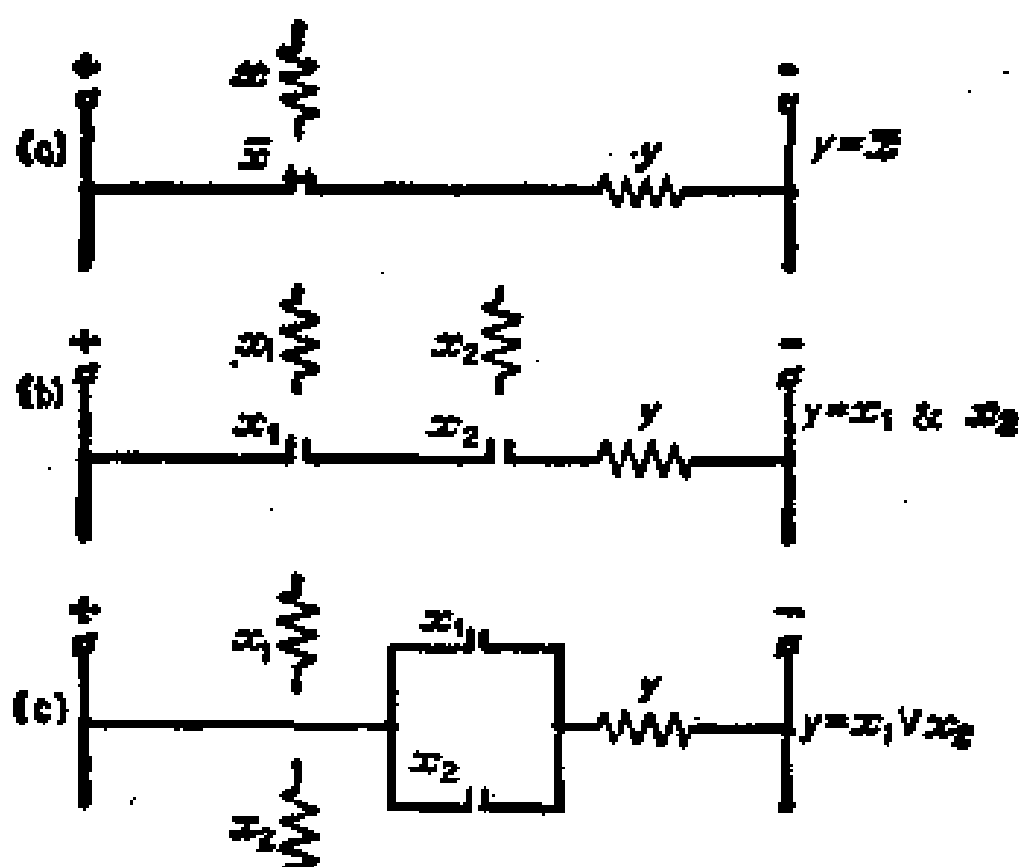


图 9.3. 实行基本逻辑函数的继电电路

写出使 $y=1$ 的条件，并用逻辑加把这些条件连接在一起，我们就得到函数 F 的表达式(已写成所谓析取范式)：

$$y=(x_1\&\bar{x}_2\&\bar{x}_3)\vee(x_1\&x_2\&\bar{x}_3)\vee(\bar{x}_1\&x_2\&x_3)\vee(x_1\&x_2\&x_3). \tag{9.2}$$

(9.2) 式的意思是，如果 $x_1=1$, $x_2=0$, $x_3=0$, 或者 $x_1=1$, $x_2=1$, $x_3=0$, 或者……的话，y 就应当等于 1 (这从表 9.2 可以看出来). 可以据 (9.2) 式装出一个电路(图 9.4)，使每个括号都对应于一个触点顺序相接而成的开路 (常开触点用无否定的符号表示，常闭触点用有否定的符号表示)，而整个表达式可以用四个开路并联而得到.

表 9.2

x_1	x_2	x_3	y
0	0	0	0
1	0	0	1
0	1	0	0
0	0	1	0
1	1	0	1
1	0	1	0
0	1	1	1
1	1	1	1

容易看出，这种电路将实现表 9.2 中给定的变换. 但是除了这个电路外，还有无穷多个别的电路，它们也实现给定的变

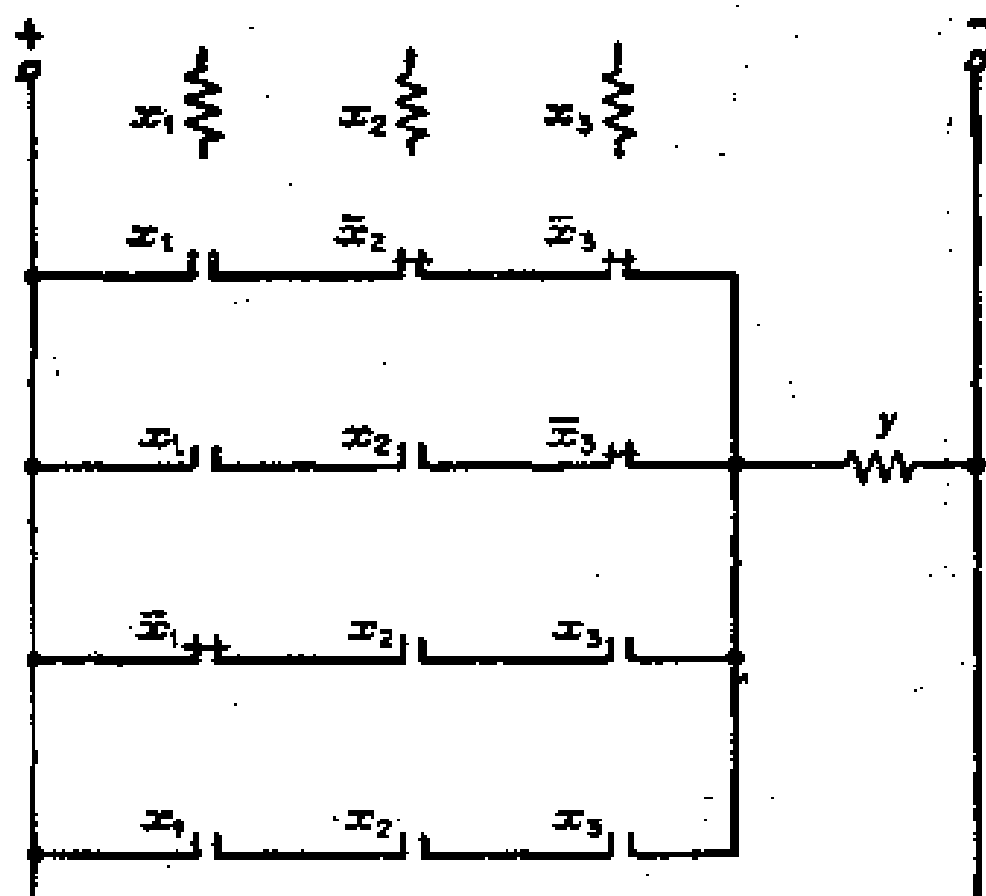


图 9.4. 实现逻辑函数(9.2)的电路

换函数. 显然，按析取范式直接得到的这个电路并不能证明所用的元件数目是最少的，或无误操作的可靠性是最高的.对本例而言，这个电路还能简化而不改变它所实现的函数，这从图 9.5 可以看出. 结果所用的触点将从 12 个减少到 7 个.

逻辑自动机也可以用无触点元件制成，特别是可以用二极管电路的形式制成.

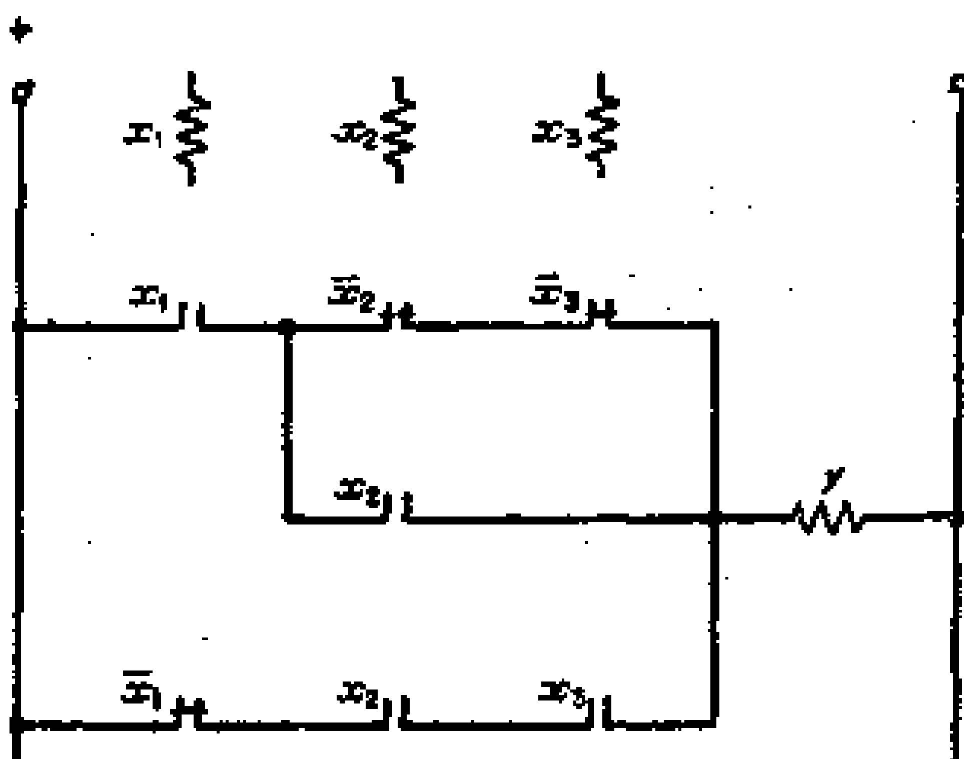


图 9.5. 与图 9.4 所示电路等价的较简单电路

图 9.6(a) 和 (b) 表示实现逻辑函数"与"和"或"的二极管电路. 这两个电路的工作原理是，根据加在二极管两端的电压的极性不同，二极管的电阻会起变化. 如果馈入二极管三角形端的电位比馈入小竖杠端的电位来得高，二极管的电阻就低；而如果极性倒转，二极管的电阻就高了. 在电路 9.6 中，"0"信号是比较低的正电位 V_0，"1"信号是比较高的正电位 V_1. 显然在电路 9.6(a) 里，仅当 x_1 和 x_2 这两端的电位都

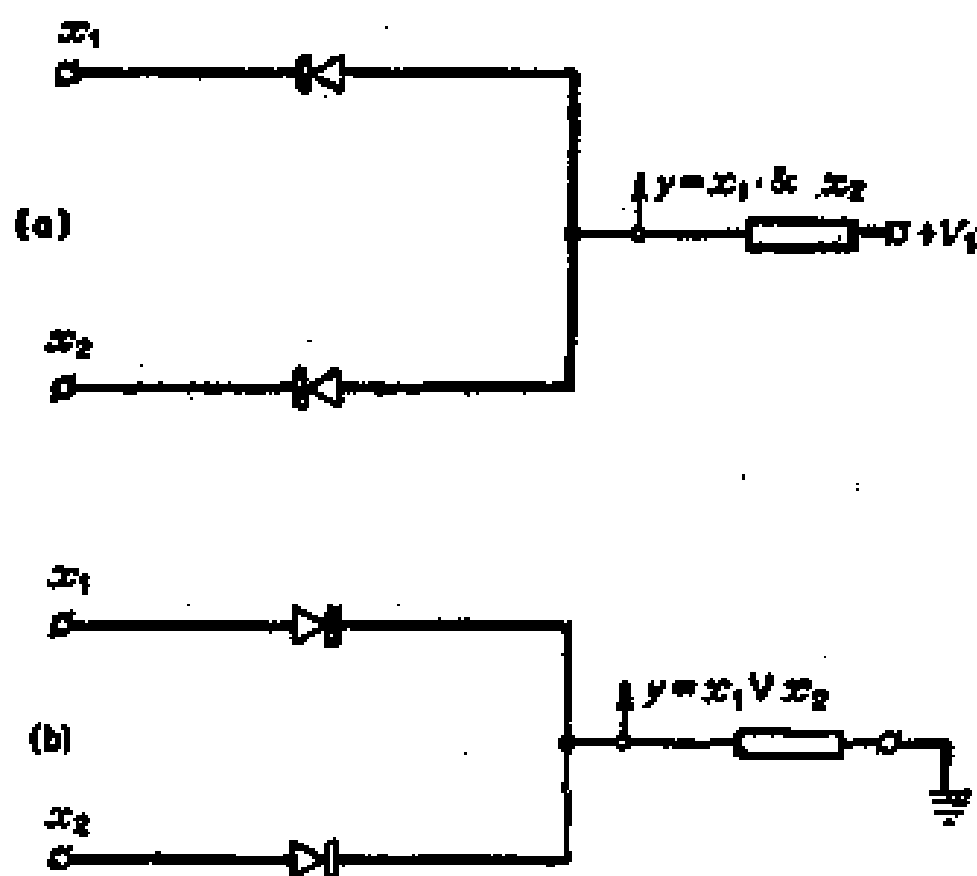


图 9.6. 实现基本逻辑函数的无触点(二极管)电路

等于 V_1 时，输出端 y 的电位才接近于 V_1（即，记作 1）. 如果情况不是这样，那么可证明 y 是通过一个高电阻连到较高的电位 V_1 以及通过一个低电阻连到低电位 V_0 的，并且将取后者的（较低的）电位. 在图 9.6(b) 里，如果 x_1 和 x_2 中至少有一端的电位为 V_1，则 y 端的电位将接近于 V_1，因为 y 端的那个高电位将通过一个低电阻连到输出.

具有二极管电路形式的逻辑自动机，通常排成矩阵的形式（即排成行和列）. 图 9.7 表示一个二极管矩阵，它实现函数 (9.2). 这个矩阵电路是直接从析取范式推出的，因为行数

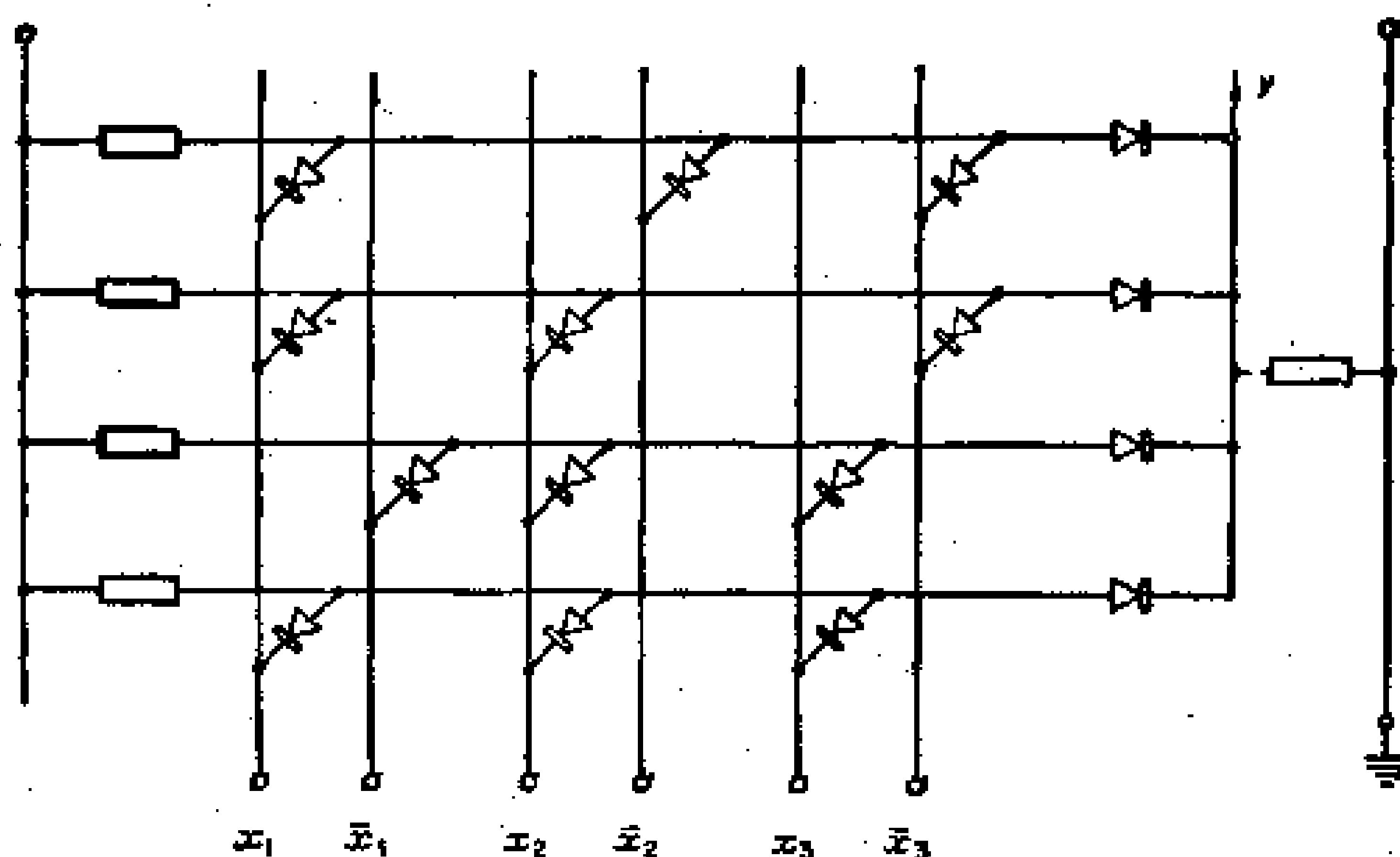


图 9.7. 实现函数 (9.2) 的二极管电路

是由析取范式中的括号项数确定的。在每一行中，二极管都根据它在析取项中是如何出现的而和适当的输入(或其否定[1])相连。所有各行都用"或"电路连在一起，"或"电路以 y 端和负汇流条之间的电压的形式产生输出值 y。

9.2. 有限记忆自动机

在研究有限记忆自动机时，我们通常只关心它的稳态，这个稳态是在输入变量发生变化后，经过了足够长时间才建立起来的。我们假设，这个系统从一个稳态转移到另一个稳态所需时间，与输入变量的两个相继变化间的时间相比，要快得多。基于这一理由，在以 Δt 为间隔的离散时刻 t_1, t_2, $\cdots$ 上研究有限记忆自动机的行为是方便的。我们附带假设，这时输出变量只能在时刻 t_1, t_2, $\cdots$ 上变化，这些时刻叫做"周期"。

1) 在这个电路中，未标出实现否定运算的元件。

按定义,有限记忆自动机在第 i 周期的输出,依赖于在第 $i-1$ 周期的自动机状态和第 i 周期的输入状态. 所以这种自动机从一个状态向另一状态的转移,一般可以用表达式

$$\left.\begin{aligned} y^i &= F(z^{i-1}, x^i), \\ z^i &= G(z^{i-1}, x^i), \end{aligned}\right\} \tag{9.3}$$

来描写, 这里 y^i 是在第 i 周期的自动机输出, z^{i-1} 是在第 $i-1$ 周期的自动机状态,而

$$x^i = \{x_1^i, x_2^i, \cdots, x_m^i\}$$

是在第 i 周期的自动机输入. F 和 G 则是逻辑状态和输入的函数.

为了使自动机实现变换 9.3, 它除了包含实现逻辑函数的元件外,还必须包含**延迟元件**,延迟元件的输出取决于它在上一周期的状态的值,就是说,它是这样的元件,它的输出 y 与输入 x 的关系是

$$y^i = f(x^{i-1}).$$

特别地,

$$y^i = x^{i-1}.$$

延迟元件应当包含记忆先前状态序列的存储器,不然它的状态是不能依赖于早先的状态的. 一种得到广泛使用的具有记忆的离散元件是触发器,它是一个具有双稳态的线路,而且它能够在控制信号的作用下从一个稳态变为另一个稳态. 触发器可以由各种元件组成, 特别是由电子元件组成, 如图 9.8 所示. 这里由于正反馈(在一个三极管的阳极电流和另一三极管的栅极电压之间的联系),整个电路可以处于下列两种条件之下:

(1) 状态 z_1: 三极管 L_1 导通(栅极电压为正); 阳极电流 I_{a1} 大;电压 V_{a1} 低;三极管 L_2 截止 (负栅极电位); 阳极电流 I_{a2} 小;输出电压 $V_{出}$大, $V_{出} = V_1$.

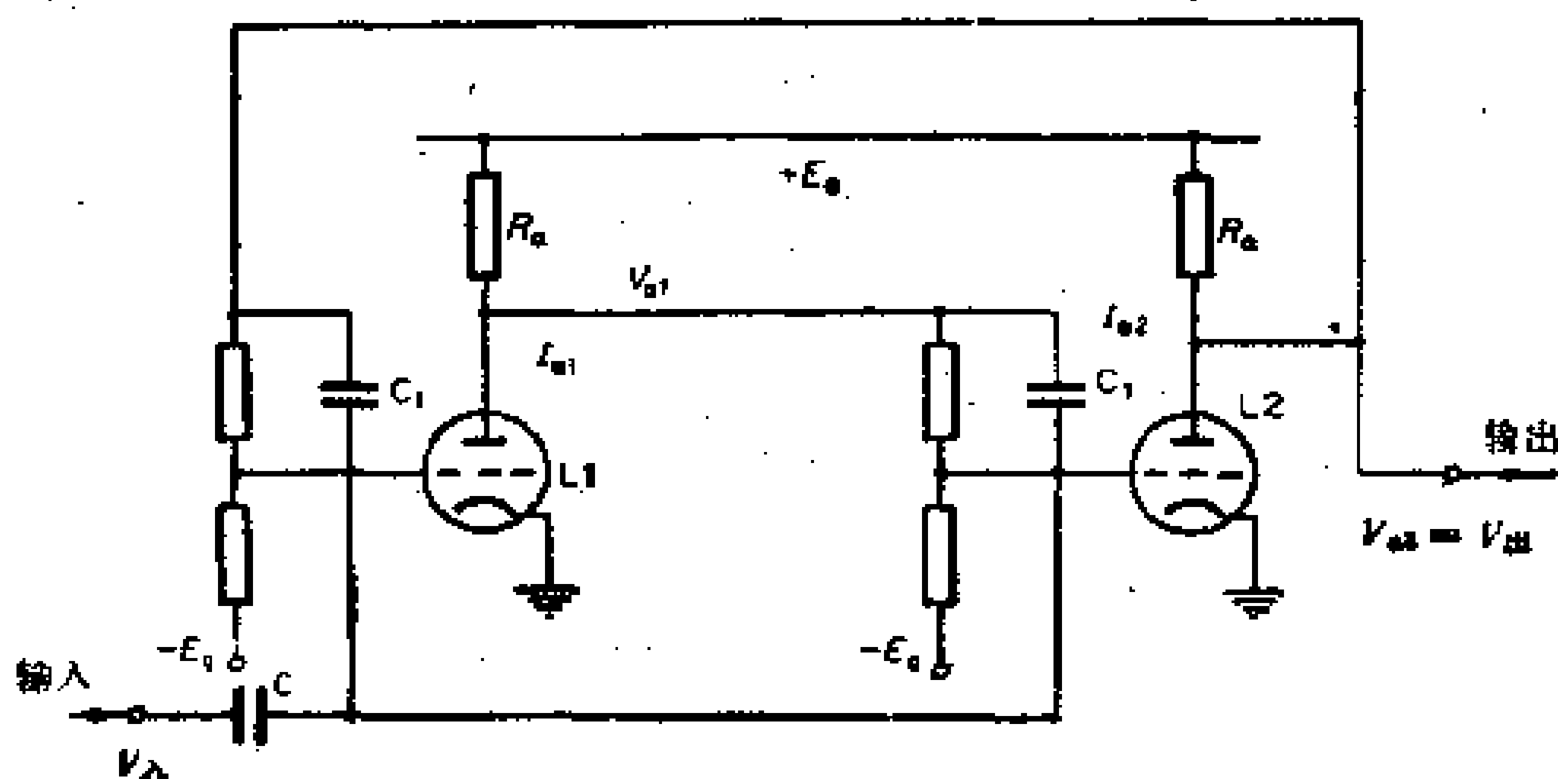


图9.8. 三极管触发器

(2) 状态 z_2: 三极管 L_1 截止(在电路上电位为负); 阳极电流 I_{a1} 小; 电压 V_{a1} 高; 三极管 L_2 导通(栅极电压为正); 阳极电流 I_{a2} 大; 输出电压低, $V_{出}=V_0$. 通过对输入的作用, 这个电路可以从状态 z_1 变为状态 z_2. 如果一个电压脉冲是电容器馈给输入的, 那么它通过电容器C转变为两个脉冲: 一个正脉冲和一个负脉冲. 电路参数是这样选定的, 使正脉冲对工作不产生影响, 但是负脉冲却使导通三极管截止, 而导通三极管又触发早先已经截止的三极管, 也就是使得电路转变到第二个稳态. 结果, 每一个控制脉冲都改变电路的状态, 而偶数个脉冲又使电路回到它原来的状态.

我们将把加在触发器输出上的低电压叫做0, 而把高电压叫做1. 显然, 触发器在一个特定时刻(周期)的输出 y^i 唯一地决定于它的状态 z^i. 所以触发器输出对这一时刻的输入以及上一时刻状态的依赖关系, 可以表达为对这一时刻输入以及上一时刻输出的依赖关系. 触发器就用这种方法实现延迟函数, 即它记住一个状态. 双稳态转移列在表9.3中. 从这张表可推出逻辑转移函数的下列表达式:

$$y^j = x^j \& \bar{y}^{j-1} \vee \bar{x}^j \& y^{j-1}. \tag{9.4}$$

我们将把数字计算机中所用的电子计数器的电路，看作是有限记忆自动机的例子。这个电路的任务是计算发到输入的脉冲数量，即把脉冲数量变换为表示这个数量的二进制数码。

表 9.3

y^{j-1}	x^j	z^j
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

为此，我们作出由触发器组成的电路，如图 9.9 所示。图中前面每一个触发器的输出都和下一个触发器的输入相连接。我们假设开始时所有触发器都处于"0"状态，即在它们的输出上的电压都等于 V_0。当在触发器 T_1 的输入处发生第一个脉冲时，在它的输出上就有电压 V_1，而在触发器 T_2 的输入处就有一个正电压脉冲，对这一脉冲，T_2 不作反应。第二个脉冲使 T_1 恢复到"0"状态，结果加在 T_1 的输出上的电压将从值 V_1 变到 V_0，同时产生一个加在 T_2 的输入上的负脉冲，使 T_2 转移到"1"状态。这样一来，每当在电路输入处输入脉冲之后，T_1 就改变状态；在每两次脉冲之后，T_2 就改变状态；在每四次脉冲之后，T_3 就改变状态，等等；而每 2^k 次脉冲之后，T_{k+1} 就改变状态。如果我们把各个触发器的状态看作是适当地(相应地)释放的二进制数的数值，那么 r 个触发器构成的整个链的状态，就表示已经馈入电路输入的脉冲个数(二进制表示)。

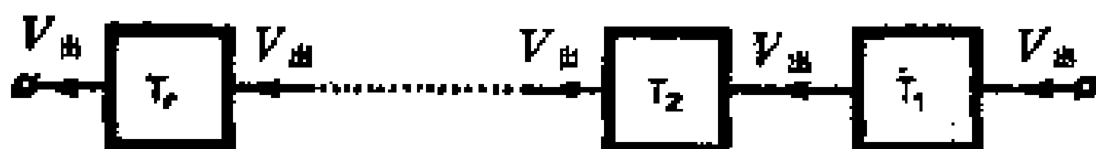


图 9.9. 用触发器进行脉冲计数

这个电路的容量——可以数出的脉冲最大个数 R——是

由数 r 确定的，且等于由 r 个数字组成的最大二进制数，即

$$R = 2^r - 1.$$

有限记忆自动机被广泛地应用于自动化和计算. 这种自动机的理论也有助于理解生物学系统中支配信息加工的某些关系.

9.3. 图灵（Turing）机器

控制和通信系统中的有目的的信息加工运算，以及用计算机或人工解决各种问题，都可以看作是一个有次序的运算序列. 把原始数据变换为所求结果总要经过运算，确定这种运算的内容和序列的指令叫做**算法**.

作为较简单的算法的例子，我们可以举出这样的运算序列：解算术问题、解代数方程、计算图形面积. 当要求自动机实现第9.1节中所描述的给定逻辑函数时，根据给定逻辑函数设计逻辑自动机的方法，也可以看作是设计逻辑自动机线路的**算法**. 在第六章里提到，在产生控制信号的控制装置中进行的信息加工，也是借助于一种特定的算法——控制算法来实现的.

任何算法都应当满足下列要求：**确定性**、**普遍性**和**有结果性**. 所谓"确定性"，我们在此地理解为它是精确的、唯一的，而不带一点儿任意性. "普遍性"是指这种算法可以用于一整类问题，所以并非只适用于一个问题，仅仅是原始数据不同而已. 如果一个算法，在执行了**有限个**运算之后，就能导致所求的结果，"有结果性"的要求就算满足了. 我们往往把"能给出结果"叫做"有效性".

如果把随便哪种算法 A 所加工的一切可能原始数据的集合表示为序列

$$\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_i,$$

而把一切可能的结果表示为序列

$$\beta_1, \beta_2, \cdots, \beta_j$$

的形式，那么把原始数据 α_i 变换为结果 β_j 的任何算法 A，都可以归结为计算函数 ϕ_k，它按照原始数据集合的号数 i 指出结果 j 的号数

$$j = \phi_k^{(i)}. \tag{9.5}$$

指标 i 和 j 是整数，我们永远可以用有限个"0"和"1"把它们写成二进制. 这时 ϕ_k 可以看作是这样一个逻辑函数，它把自动机输入处的状态 i 变为输出处的状态 j.

所以在原则上，任何算法都可以借助于适当的离散自动机来实现.

英国数学家 A. M. 图灵提出了一种自动机的抽象线路，这种自动机在原则上适于实现任何算法. 这种自动机——叫做"图灵机器"——是一种无限记忆自动机.

图灵机器中的存储器是一条带子，它被划分成编号 1，2，…的一个个方格，使得带子有开端(第 1 号)而无结尾(按自然数列而延伸到无限).

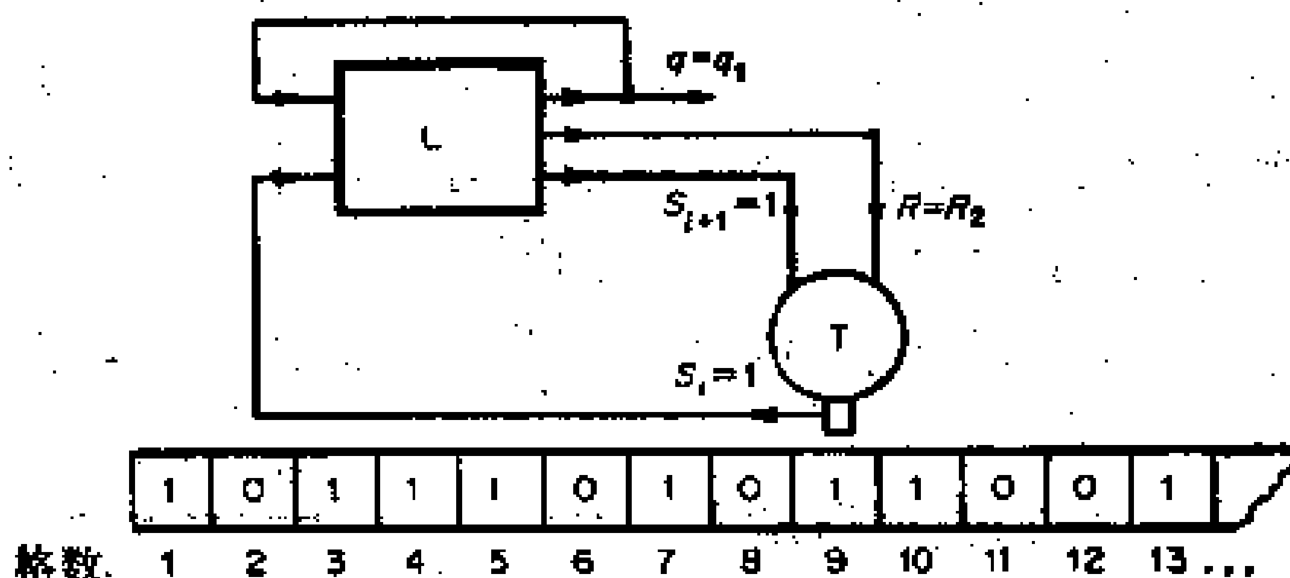


图 9.10. 图灵机器

在各个方格中都可以记录"0"或"1". 在带子上方移动一个读写磁头，它是由有限记忆自动机 L 来控制的(图 9.10). 自动机 L 按周期工作，关于符号(0 或 1)的信息，由磁头从带

子上读出，而馈给 L 的输入. 磁头根据在每个周期中从自动机 L 得到的指令而工作，它可以停留不动或向左、向右移动一小格. 与此同时，磁头从自动机 L 接收指令，执行收到的指令，它就可以更换记录在磁头下面方格中的符号.

图灵机器的工作唯一地决定于带子方格的初始存储和控制自动机的变换算子，这个算子可以表示为转移表的形式.我们用 $S_i(S_0=0,\ S_1=1)$ 表示磁头读出的符号；用 $R_j[R_0$（停止），R_1（左移），R_2（右移）] 表示移动磁头的指令；用 $q_k(k=1,\ 2,\ \cdots,\ n)$ 表示控制自动机的状态，那么它的转移表可以表示如左.

表 9.4

输入	状态	
	$S_0=0$	$S_1=1$
q_1	$S_0,\ R_2,\ q_k$	$S_1,\ R_1,\ q_m$
q_2	$S_1,\ R_0,\ q_s$	$S_0,\ R_1,\ q_t$
q_3	$S_1,\ R_1,\ q_p$	$S_0,\ R_2,\ q_2$

从表 9.4 中可以看出，自动机 L 的动作依赖于输入 S 和它的状态 q. 对于确定的值 S_i 和 q_i，将有 $S,\ R,\ q$ 这三个量的某一组值与之对应，这三个量分别指明，磁头应在带上记录什么符号 S，移动磁头的指令 R 是什么，自动机 L 将变到什么新状态 q. 我们必须记住，在自动机 L 的状态 q 中至少应当有这样一个状态 q^*，对于这个状态来说，磁头不改变符号 S，指令 $R=R_0$（停止），而自动机 L 仍处于停止位置 q^*. 到达状态 q^* 时自动机就停止执行算法，图灵机器就不再操作了.

例如，我们假定自动机 L 的转移表是右面的序列.

表 9.5

q	S	
	0	1
q^*	$0,\ R_0,\ q^*$	$1,\ R_0,\ q^*$
q_1	$1,\ R_0,\ q^*$	$1,\ R_2,\ q_1$

如果一开始自动机处于状态 q_1，磁头是在记录符号 "1" 的方格上方，那么磁头将向右移动，直到检出记有符号 "0" 的方格为止，并把 "0" 换为

"1"，然后停止。如果这个系统的初始状态(在零周期的状态)和带子的存储内容如图 9.10 所示，那么根据表 9.5，这个系统将在接连两个周期内变为如图 9.11 所示的状态，并在第二个周期后停止。

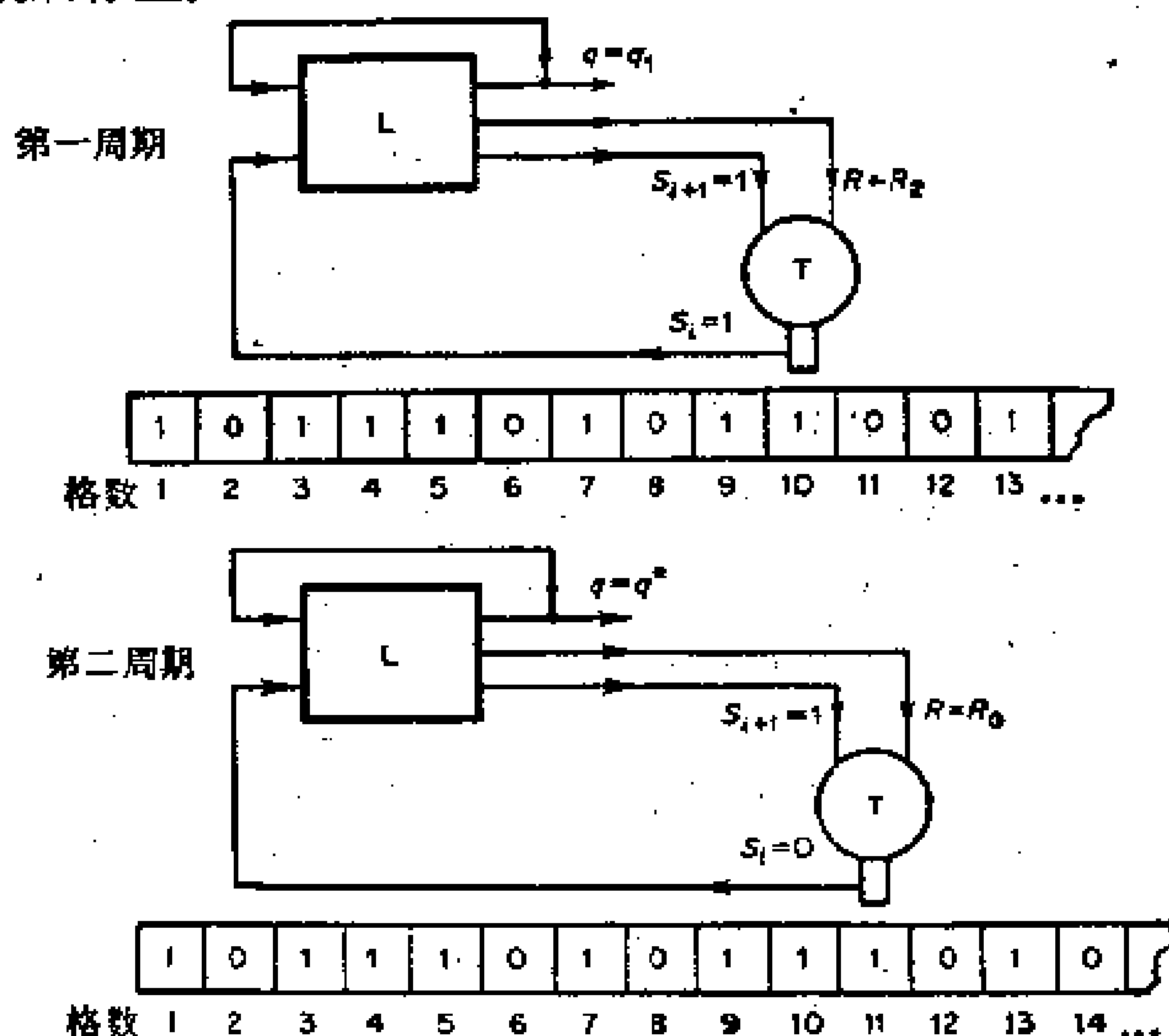


图 9.11. 图灵机器工作的例子

这个例子只给出了一个由图灵机器解决的最简单的问题。如果适当地扩充转移表，就可以用图灵机器解决不管多么复杂的问题，解决任何别的机器能解决的任何问题，因此它被称为"通用图灵机器"。但我们必须记住，在实际上使用按图灵原理作出的自动机是不现实的，因为解决非常复杂的问题所需的步数极多，这就意味着需要非常长的解题时间。

尽管如此，对于某一类问题的解的算法的存在性这种重要问题，图灵机器理论是很重要的。也就是说，图灵机器理论也可以指明什么功能是能自动完成的，什么功能是不能自动

完成的，特别是用象数字计算机这样的通用自动机。

9.4. 概率自动机

在前几章中只讨论了这样的自动机，它们的状态是输入变量和前一时刻状态的单值函数. 这种自动机的行为是可以精确预测的，只要转移算子是已知的，以表或逻辑函数的形式给出，而初始状态和输入序列也是已知的. 根据这个理由，把这种自动机叫做确定型自动机. 但是常常有必要研究这样的系统，它的未来状态并不由初态和输入值唯一确定. 系统可以从同一个状态和同一个输入变到不同的状态，因此输出值也可以是不同的，所知道的只是变为这个或那个状态的转移概率. 这种系统叫做概率自动机. 显然，确定型自动机是概率自动机的特例，在后者中，某一个转移的概率等于1，而所有别的转移概率则等于0，不管它的初态是什么.

应当指出，确定型自动机和概率自动机的区别不是绝对的. 一方面我们绝不能任意精确地辨别一个系统的不同物理状态，因为由于无法考虑到的随机起伏和噪声，可能被我们当作确定的状态，不过是各种状态的一个集合的同态象罢了(见第三章). 因为这一点，也由于较大的扰动(系统陷于混乱)，系统在操作期间的行为，一般说来，是不能绝对肯定地加以预测的，虽然对给定目的来说，这种预测值已经可用了.

另一方面，一个系统，虽然若对其状态区分得更细些就可以把它看成是确定型自动机，我们往往仍把它看作概率自动机.

在电话用户看来，电话网是个概率自动机. 在拨号时，它将以概率 p 和 $1-p$ 回答以信号 y_1(忙音)或 y_2(振铃音)，这和网络的平均负载有关. 如果我们知道了整个呼叫的集合和网络中的所有联结，我们就能精确地预测拨号的回答是什么

了——这个系统就是个确定型自动机了.

我们假设，一个概率自动机可以处于 $z_1, z_2, \cdots, z_n$ 中的任一状态，输入值 x 可以取任何值 $x_1, x_2, \cdots, x_m$，而输出值 y 可以取任何值 $y_1, y_2, \cdots, y_l$。那么，当上一状态是 $z^{i-1} = z_j$ 而输入信号是 $x^i = x_r$ 时，这种自动机就可以描写在已知条件下转移到状态 $z^i = z_k$ 的概率:

$$p(z_k^i / z_j^{i-1}, x_r^i) = p_{jk}(r), \tag{9.6}$$

此外，输出值应作为自动机状态的函数而给出:

$$y^i = f(z^i), \tag{9.7}$$

这里第 i 个周期，是表示时刻 t_i 的数。(9.6) 和 (9.7) 式完全描述了概率自动机。(9.6) 式可以用图表示为一组转移概率矩阵的形式，每一个矩阵都对应于固定的一组输入值 x_r。表 9.6 给出了这样的一个矩阵. 有多少不同的 x 值就有多少矩阵，即共有 m 个矩阵。

表 9.6

z^{i-1}	z^i			$\sum_k p_{jk}$
	z_1	$z_2 \cdots$	z_n	
z_1	p_{11}	$p_{12} \cdots$	p_{1n}	1
z_2	p_{21}	$p_{22} \cdots$	p_{2n}	1
·	·	·		
·	·	·		
·	·	·		
z_n	p_{n1}	$p_{n2} \cdots$	p_{nn}	1

应当指出，自动机的一切可能转移的概率之和必定等于 1。所以各行概率值之和恒等于 1，如矩阵右边附加的一列所示。

概率自动机的概念对于解决各种各样的控制论问题也是重要的，特别是对解决那些和适应系统有关的问题来说更是

如此，适应系统将在第十一章中研究。在研究生物学、心理学、社会学中所遇到的非常复杂的系统时，概率自动机就特别重要。这种系统通常表示一个“黑盒”(见第三章)，它们的状态只能从输出信号来判断。例如我们可以把一位象棋手当作黑盒(概率自动机)，他在回答输入信号(他的对手的第一着，如“炮二平五”或“卒三进一”等)时，将选择这样或那样的着法(“马八进七”或“相三进五”等)，选择的概率可以根据他的实践经验估计出来。遗传定律、微观粒子的布朗运动、经济过程、军事行动——这许多现象都可以用概率自动机的概念来描写。

练习

1. 编一张由下式给出的逻辑函数表：

$$f(x_1,x_2,x_3)=\bar{x}_1x_2x_3\vee x_1\bar{x}_2x_3\vee x_1x_2\bar{x}_3.$$

解：见表 9.7。

表 9.7

x_1	x_2	x_3	$f(x_1,x_2,x_3)$	x_1	x_2	x_3	$f(x_1,x_2,x_3)$
0	0	0	0	0	1	1	1
0	0	1	0	1	0	1	1
0	1	0	0	1	1	0	1
1	0	0	0	1	1	1	0

2. 设 $f(x_1, x_2, x_3)$ 如表 9.8 所示。

表 9.8

x_1	x_2	x_3	$f(x_1,x_2,x_3)$	x_1	x_2	x_3	$f(x_1,x_2,x_3)$
0	0	0	0	0	1	1	1
0	0	1	1	1	1	0	1
0	1	0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	1	1	1	0

写出这一函数的析取范式。试把它简化。画出实现这一函数的二极管电路。

解：$f(x_1,x_2,x_3)=\bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3\vee\bar{x}_1x_2\bar{x}_3\vee x_1\bar{x}_2\bar{x}_3\vee$

$$\vee\bar{x}_1x_2x_3\vee x_1x_2\bar{x}_3\vee x_1\bar{x}_2x_3.$$

这个函数简化后形如

$$f(x_1,x_2,x_3)=\bar{x}_1x_3\vee x_2\bar{x}_3\vee x_1x_2.$$

实现这个函数的二极管电路如图 9.12 所示。

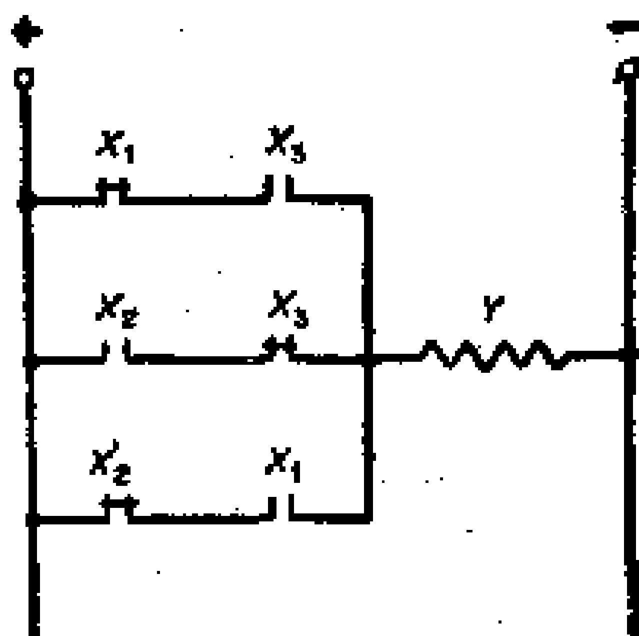


图 9.12 （第 2 题）

3. 函数 $x_1\rightarrow x_2$（读"从 x_1 推出 x_2"）如表 9.9 所示，写出这个函数的析取范式并简化它。

表 9.9

x_1	x_2	$f(x_1,x_2)$	x_1	x_2	$f(x_1,x_2)$
0	0	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1

解：这个函数简化后形为

$$f(x_1,x_2)=\bar{x}_1\vee x_2.$$

4. 用变量 p，q 和 r 写出表示下面那句话的逻辑表达式："如果晚上下雨，我们就不去看电影，而去学习"（使用第 3 题中的逻辑函数）。

解：我们用 p 表示“晚上下雨”，用 q 表示“我们去看电影”，用 r 表示“我们将学习”。那么 $p \to \bar{q} \& r$。

5. 一个探险家落到了一群吃人生番手里。他们决定让他说一句话，并提出条件：如果他说的是真话，他们就把他煮了吃；如果他说了假话，他们就把他烤了吃。他必须说句什么话才能使自己不被杀死？

解：探险家必须说：“你们将把我烤了吃。”

6. 试编出一张图灵机器的转移表，这个机器由任意两个自然数 n_1 和 n_2 组成，它们在带子上表示为具有 n_1+1 和 n_2+1 个 1 的两列数。这两列 1 被写有符号 0 的一个方格所分开(计算终止以后，写在带子上式子里的 1 的个数，就作为计算结果)。在初始状态，读数磁头位于符号 1 的上方。

解：图灵机器应当按照下列法则操作：

1. $q_1\ 10\ q_1$，　　4. $q_2\ 0R_2\ q_3$，
2. $q_1\ 0R_2\ q_2$，　　5. $q_3\ 10q_3$，
3. $q_2\ 10q_2$，　　6. $q_3\ 0R_0\ q^*$。

这些法则的意思是：机器在状态 q_1 处把 1 换为 0，q_1 保持不变；在状态 q_1 处，如果机器扫描到一个记有 0 的方格，它就向右移动；在状态 q_2 处，如果它发觉(扫描)了 1，它就向右移动；如果它扫描到 0，则变为状态 q_3，并向右移动一个方格；在状态 q_3 处，它把 1 换为 0，然后停机。这台机器去掉了两个 1，此后在带子上保留 n_1+n_2 个 1。

7. 格·孟德尔(Gregor Mendel)在阐明遗传定律的典经著作中(1865)，使用了白豌豆和紫豌豆。他证实颜色基因具有两种变体——紫色的 A 和白色的 a，变体 A 是显性基因；基因型 Aa 给出紫色，这和基因型 AA 一样。我们将把一株植物的后代的基因型的序列看作一架概率自动机的状态，把花的颜色看作输出信号，把第二个亲本的基因型看作输入信号。画

出这架自动机的转移概率矩阵，以及输出信号对机器状态的依赖关系。在杂交时等位基因的一切可能组合，都应当看作是等可能的。

解：转移概率矩阵可以写出如下(表 9.10)：

表 9.10

$x^j = AA$

x^{j-1}	x^j		
	AA	Aa	aa
AA	1	0	0
Aa	1/2	1/2	0
aa	0	1	0

$x^j = Aa$

x^{j-1}	x^j		
	AA	Aa	aa
AA	1/2	1/2	0
Aa	1/4	1/2	1/4
aa	0	1/2	1/2

$x^j = aa$

x^{j-1}	x^j		
	AA	Aa	aa
AA	0	1	0
Aa	0	1/2	1/2
aa	0	1	0

y_1表示紫色，y_2表示白色。输出信号对状态的依赖关系如表 9.11 所示。

表 9.11

x^j	AA	Aa	aa
y^j	y_1	y_1	y_2

第十章 计 算 机

使用适当的编码，就可以把任何资料换为一个数或一组数，而且资料的任何变换都可以通过对这些数进行适当运算来实现．例如任何文章都可以借助于一系列电脉冲用电报传输，这些电脉冲等价于用二进制表示的某个数，这在前几章中我们已经说明了．任何图画都可以用无线电信号由电视传输，这些信号也可以表示为数列的形式． 对于任何问题，例如下棋问题，将包括在初始资料中的资料变换为关于问题的解的信息，这个过程也可以归结为把资料编为数字码，并对这些数进行运算．

任何数都代表象 0 和 1 这样的一组离散数字，所以为了使数据加工机械化，这意味着解决很广泛的一类控制论问题，研制对这些数进行运算的必要设备是非常重要的．

数字计算机最初纯粹是为了计算而产生的．现已证明，它也适用于科学和工程的很多分支，它的用途已远远超出计算运算机械化的范围． 除了完成繁重的计算之外，数字计算机还可以作为生产设备的控制装置，并用来模拟复杂的工程、经济、生物系统． 它还可以帮助设计在竞争问题中选择策略时遇到的复杂运算，例如： 下象棋或跳棋，提出军事行动计划，诊断疾病，或设计包括新式电子计算机在内的工程设备．

程序控制数字计算机方面的发展已经达到了高水平．但是，为解决专门问题，正在研制专用数字计算机，它们可用来控制生产过程（控制机），模拟动力学系统（数字模型）等．

10.1. 数字计算机

现代的有程序控制的通用电子计算机，是由五种基本的功能装置构成的：输入器、控制器、运算器、存储器和输出器，它们由信道互相连接起来，如图 10.1 所示。

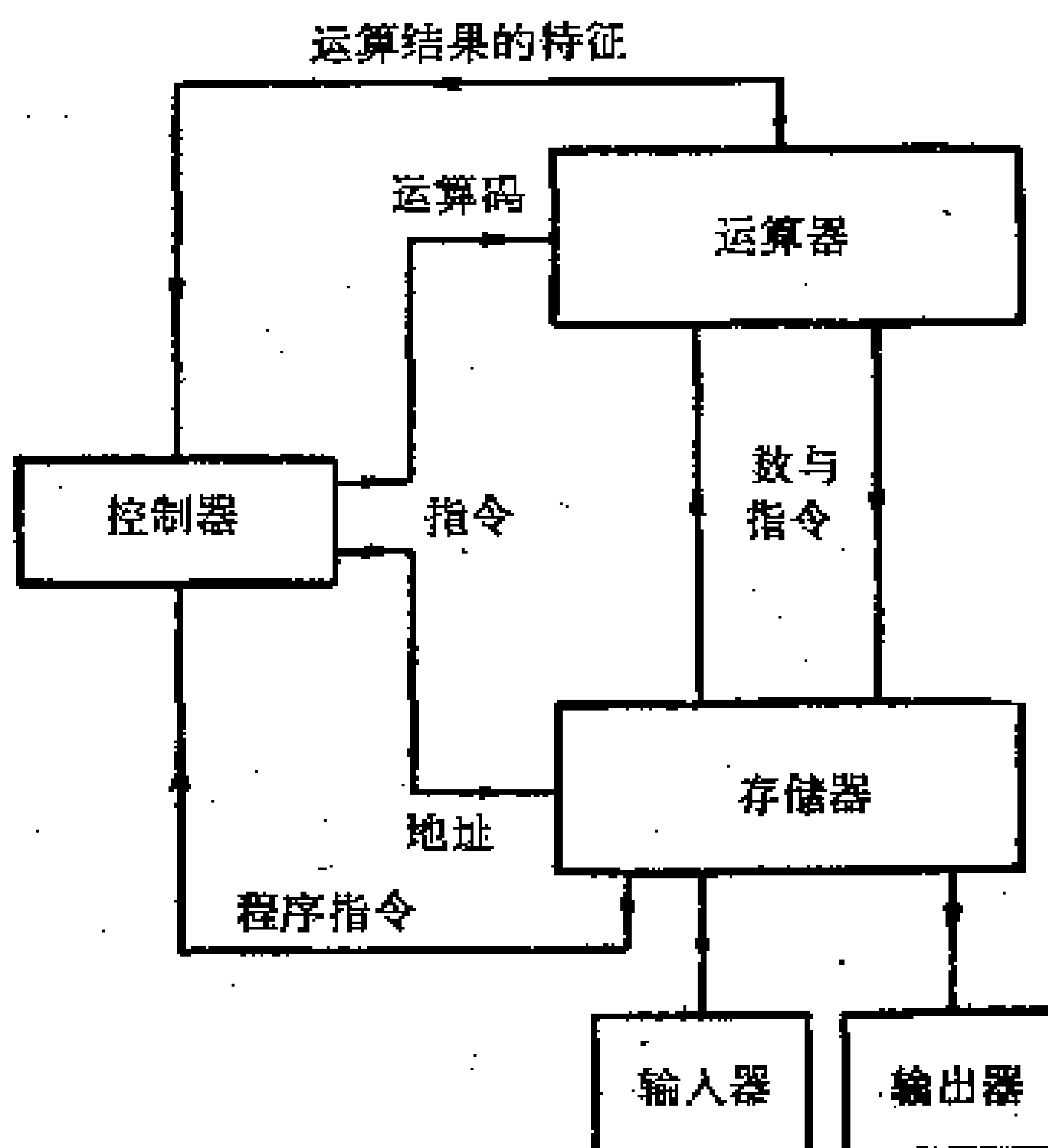


图 10.1. 数字计算机的框图

输入器把输入数据及其解法变换为电信号，并把这些数据提交给机器。控制器确保机器中各部分协调工作、决定数据在机器中的循环路线，并在将数据加工完毕后实现停机。运算器对进入计算机的数字执行算术运算、存储器用来接收、保存和恢复数字，这些数字包括原始数据、确定运算次序的指令序列和中间结果。输出器是用来提交结果的，并使所提交的结果在形式上便于进一步使用。输出器通常包括穿孔卡、穿孔带或打印纸。

用计算机解决任何问题，都可归结为对数字进行特定的一组运算．因为在计算机中只执行固定的算术运算，例如加、减、乘、除，所以解题的算法必须是一系列这种形式的运算，以及机器能执行的一些逻辑运算．

机器执行每个运算，都要根据特定的控制信号——指令来进行．指令的序列构成计算机解题的程序．程序指令是由适当的数编码的，并在开始解题前送进计算机的存储器．存储器是由固定号码（地址）的一个个单元组成的，每个单元可以存储一个数．表征一条指令的数由几部分组成．一部分是运算码，它指出应由计算机执行的运算类型，另一部分是地址，它确定保存应进行指定运算的数字的单元的号码，以及结果应当送入的单元的号码．控制器确保程序指令的执行序列，从而也实现了解决该问题的给定算法．

在计算中常常需要根据所得到的中间结果改变计算次序．例如，一元二次方程的求根过程，与根号下的式子的符号有关．在这种场合，计算机应当自动地选择计算的路径．这是通过在程序中引进特别的条件指令而达到的：根据某一特征，机器将在若干指令中选择一个，这个指令将确定进一步的计算过程．作为这种分枝程序的例子，可举出一元二次方程

$$x^2+px+q=0$$

按照公式

$$x_{1,2}=-\frac{p}{2}\pm\sqrt{\frac{p^2}{4}-q}$$

的求根程序，其框图如图 10.2 所示．

构成程序的指令序列是以数的形式提交给机器的，所以也可以对表示指令的数进行运算．这样做使我们能在计算时改变程序，也可以多次重复执行程序的个别部分（循环）．

计算机是按周期工作的离散自动机．指令、数字通常都

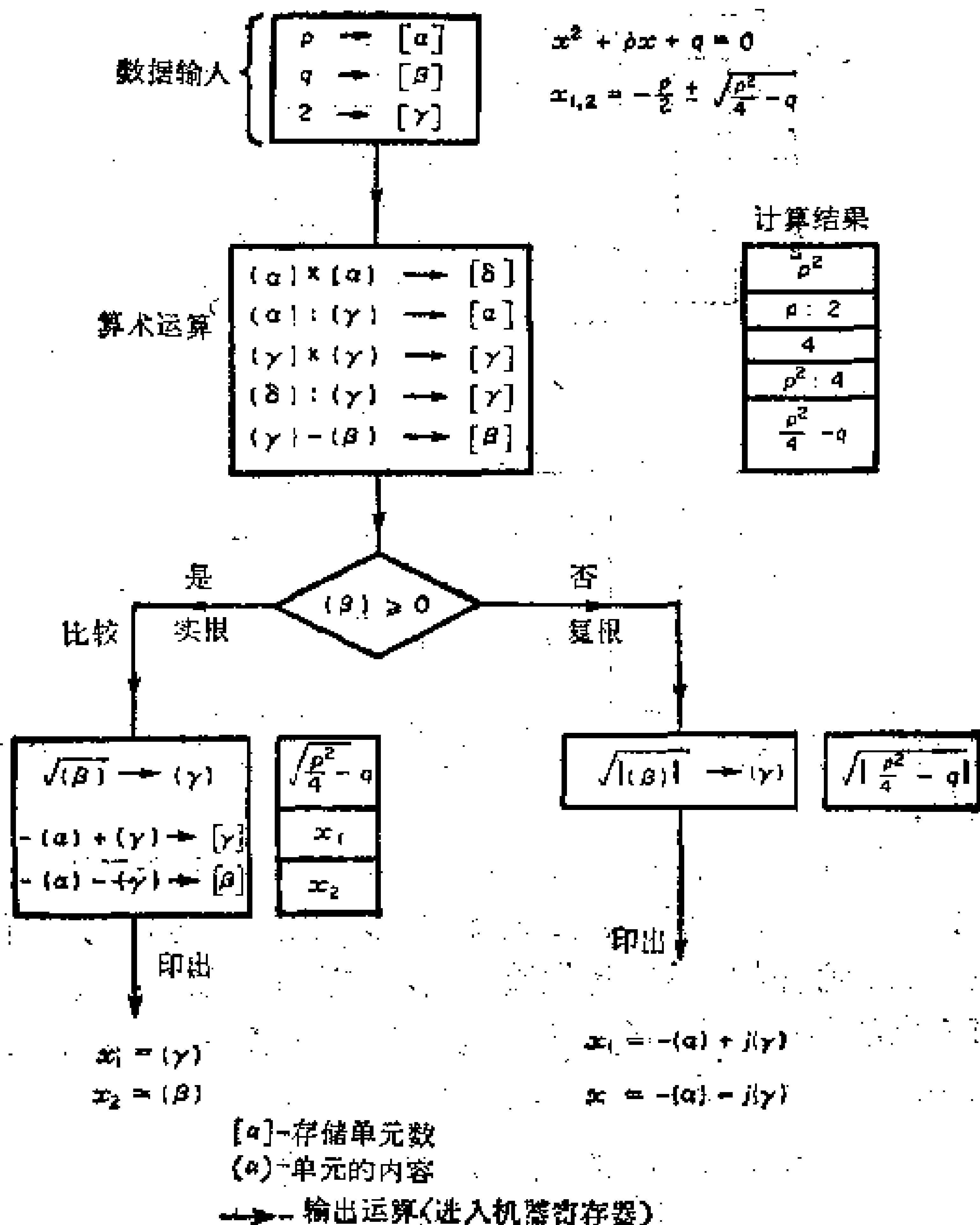


图 10.2. 一元二次方程求根程序的框图

是借助于电信号以二进制形式提交给机器的。在机器中的算术运算和逻辑运算，可用第九章中所描述的逻辑元件来进行.

计算机的基本运算是由加法器和移位器实现的。由简单的逻辑元件装成的一位加法器电路，可以用来实现两个一位的二进制数 A 和 B 的加法(图 10.3)。这种电路是在表 10.1 中

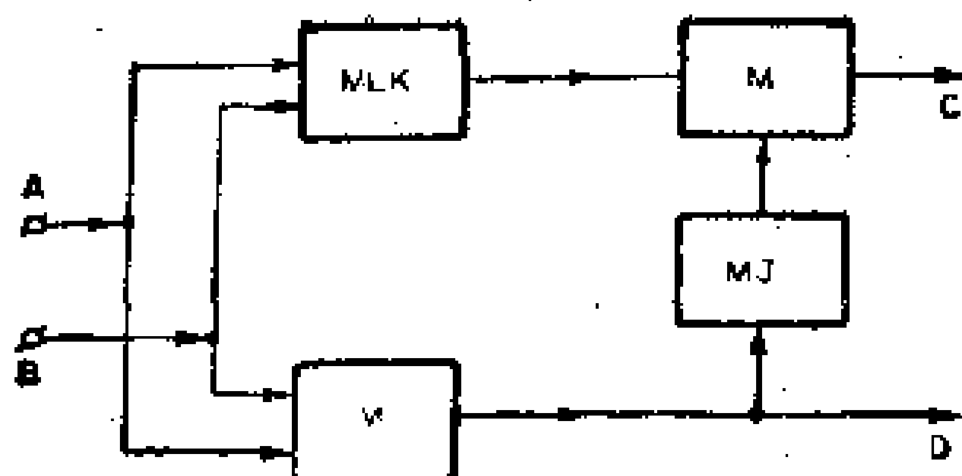


图 10.3. 一位加法器的图

表 10.1

A	B	C	D
0	0	0	0
1	0	1	0
0	1	1	0
1	1	0	1

实现的，A 加 B 的结果，放入本位记作 C，D 表示到下一位的进位。

比图 10.3 所示的要复杂些的电路，能够把三个二进制的一位数加起来。这种具有三个输入的一位加法器 SA 是多位数加法所必需的，这时每位数字上都应当加三部分：数 A 的第 i 位数字 a_i，数 B 的第 i 位数字 b_i 以及第 $i-1$ 位来的进位 d_i。多位加法器如图 10.4 所示。

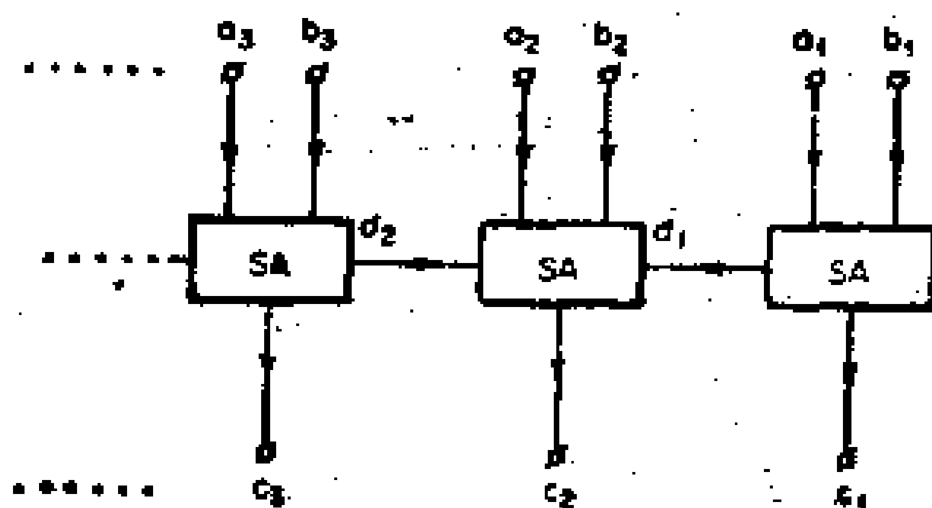


图 10.4. 多位加法器的图

乘法同手算一样，是在运算器内把数字相加和移位而实

现的. 为此使用一张乘法表,对于二进制来说,这张乘法表是很简单的:

$$0\times 0=0,\qquad 1\times 0=0,$$
$$0\times 1=0,\qquad 1\times 1=1.$$

容易看出,这张表对应于用"与"元件实现的逻辑乘运算. 在机器中,多位数乘法所需的移位运算是用**移位寄存器**实现的. 移位寄存器的一种可能的设计方法,是使用第 9.2 节中描写的两个电子计数器.

根据来自控制线路的指令,计数器 A 中的数传输到计数器 B,然后回到计数器 A,但是移动了一位,使得第 i 个数字中的 1 回到第 $i+1$ 位,如图 10.5 所示. 作为这种运算的结果,原来的数字就在每一指令后加了一倍. 例如,如果原来的数字是

0001100010110,

那么在第一次移位后,我们得到

0011000101100,

在第二次移位后,我们得到

0110001011000,

以此类推.

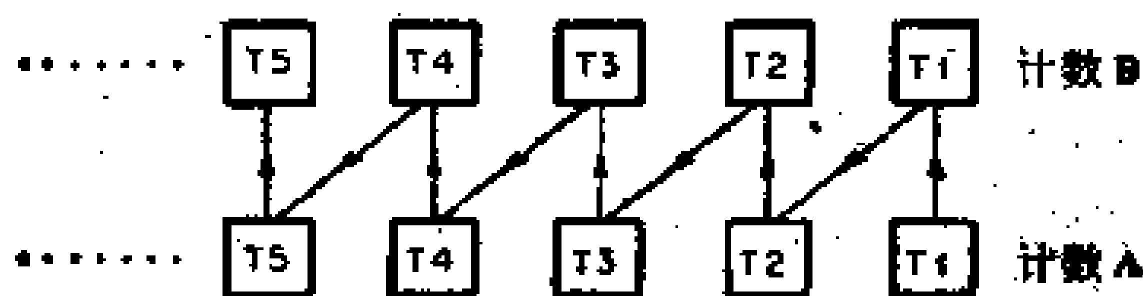


图 10.5. 移位寄存器的图

减法和除法的过程,大致与加法、乘法相似,我们就不再详细讨论了.

在现代计算机中,算术运算和逻辑运算是以非常高的速度完成的. 加法时间可以小到 0.2 微秒,乘法时间可以小到

1.2 微秒. 由于计算机工程的进展和应用了新的、微型的、低惯性的元件,所以不仅有可能保证机器的动作迅速,还能保证增加机器的可靠性,减小尺寸和增加存储量,并使检测和误差校正自动化. 改进计算机的全新的方法,用到了激光和分子电子学,从而获得每立方厘米几百万个元件的极密集的计算机元件,因之可以同人脑中神经元的尺寸相比拟.

图 10.6 是一台现代电子计算机的照片. 这种计算机被广泛用来自动地执行在科学、工程和经济学的各个分支中的复杂费力的计算. 计算机正在被用来确定宇宙飞船的轨道、预报天气、计算飞机机翼的最佳翼型和电机尺寸的最优关系、计划建造铁路、计划肥料生产,以及人口增长和门市营业额数据的统计加工. 计算机还坚实地进入了创造性活动的各种部门,原先这些部门总被认为是人类思维所独占的,如: 用计算机进行翻译,谱写管弦乐的乐谱,辨读古代手稿,证明数学定理,以及许多别的工作.



图 10.6. 英国基洛 (Giro) 系统中心的一架由国际计算机公司出品的 4-70 数字计算机系统(这张照片承蒙国际计算机公司提供)

现代生活中,没有一个领域未受到计算机及其最有力的

武器——电子数字计算机——的影响。

10.2. 控制机

近年来，除了大幅度地发展通用计算机之外，用来直接控制生产过程的专门计算机也得到了发展。牺牲了通用性，就能大大简化设计、增加操作可靠性，增加在控制给定过程中出现的那些问题的解题速度，使得反应速度能增加到相当于在被控对象中过程的速度。

生产过程控制机与计算机相比，主要差别在于，它们是直接通过输入测量仪表和输出最终执行元件，与外界相联系的。这就不需要人参与该系统的工作了，这个系统就是：被控对象＋控制计算机。

为了协同工作，这种控制计算机的输入器和输出器，必须同被控系统的测量元件和执行元件相匹配。控制计算机对过程的作用，可以直接加在对象的控制机构 CO 上，或者增加局部系统而通过局部控制装置 CD 作用到对象上。图 10.7(a) 和 (b) 说明了使用控制计算机时控制系统的这两种结构，图中的对象是由串联在一起的各加工部份 P 组成的。

图 10.7(a) 的线路比较简单。但是它要求较快速的计算机，而且可靠性较差，因为只要在控制计算机中出一故障，整个控制系统就工作不下去了。图 10.7(b) 的线路的优点是：如果计算机运算出毛病，这个系统的正常工作体制将由局部控制系统来维持。虽然在没有控制计算机的情况下，系统的各个部分工作的协调得不到保证，但是过程可以持续一段时间，使得可以纠正错误，让控制计算机恢复工作。此外，在这种系统中，迅速变化的扰动可以借局部控制装置得到补偿，所以就有可能不必对控制计算机的速度提出过于苛刻的要求。

从测量仪表得到的信号，携带着关于被控对象状态的数

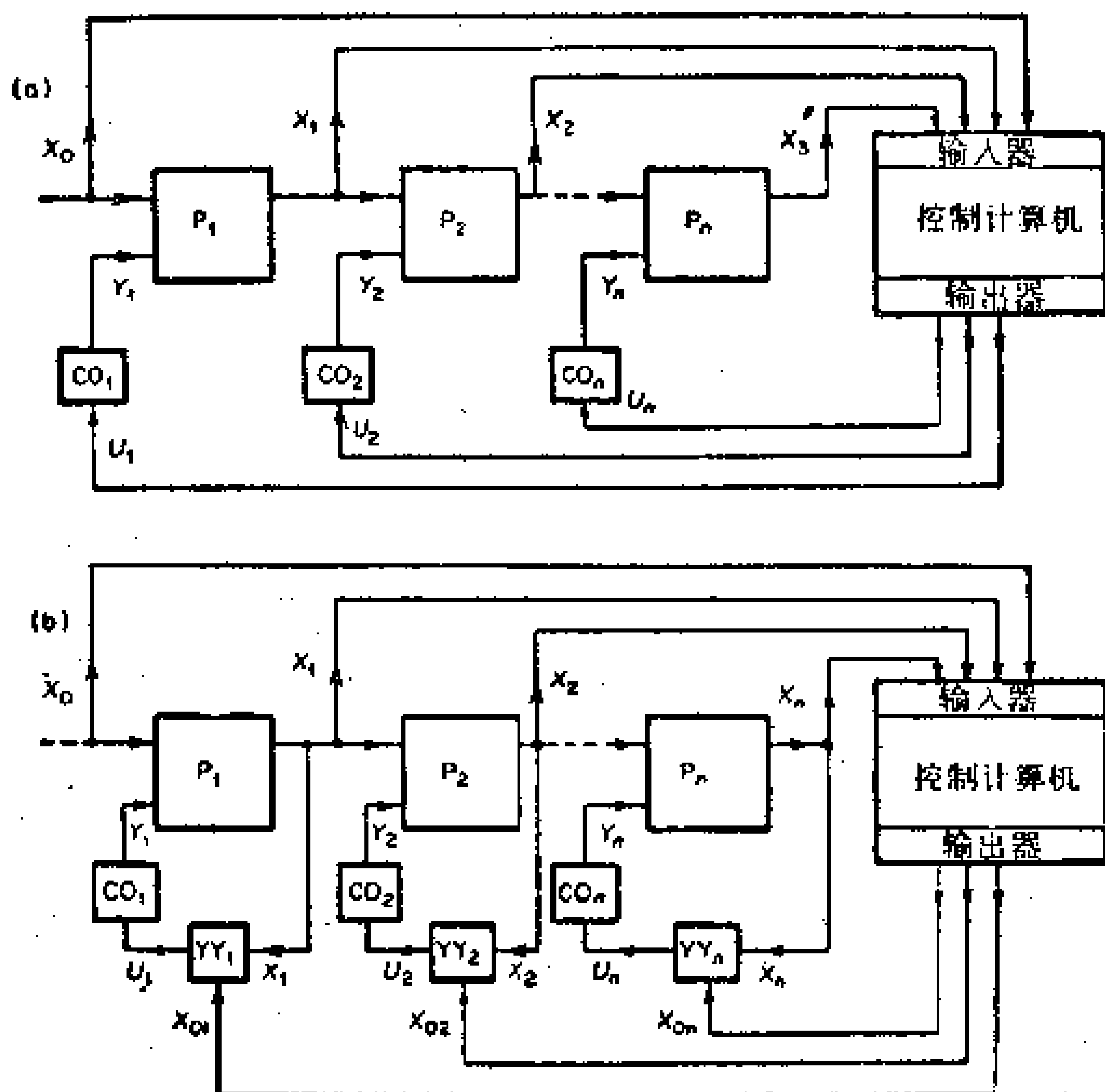


图 10.7. 控制计算机对过程的作用
(a) 直接作用于控制元件 CO;
(b) 通过局部控制装置 CD

据，通常表示为模拟形式。在这些数据送进数字计算机之前，必须把它们转换为数字，这是由模拟-数字变换器来完成的。计算机的输出信号具有数的形式，它不能直接用于模拟的执行机构或控制装置，所以要有一个从数字信息到模拟信息的逆变换，这是由数字-模拟变换器来完成的。

现在我们看看在设计这种变换器时应用的一些原理。设必须把直流电压变换为二进制数。图 10.8 给出了一种方法。这种方法的原理是使电压 E_x 与从电阻箱 R_1 — R_4 得到的电

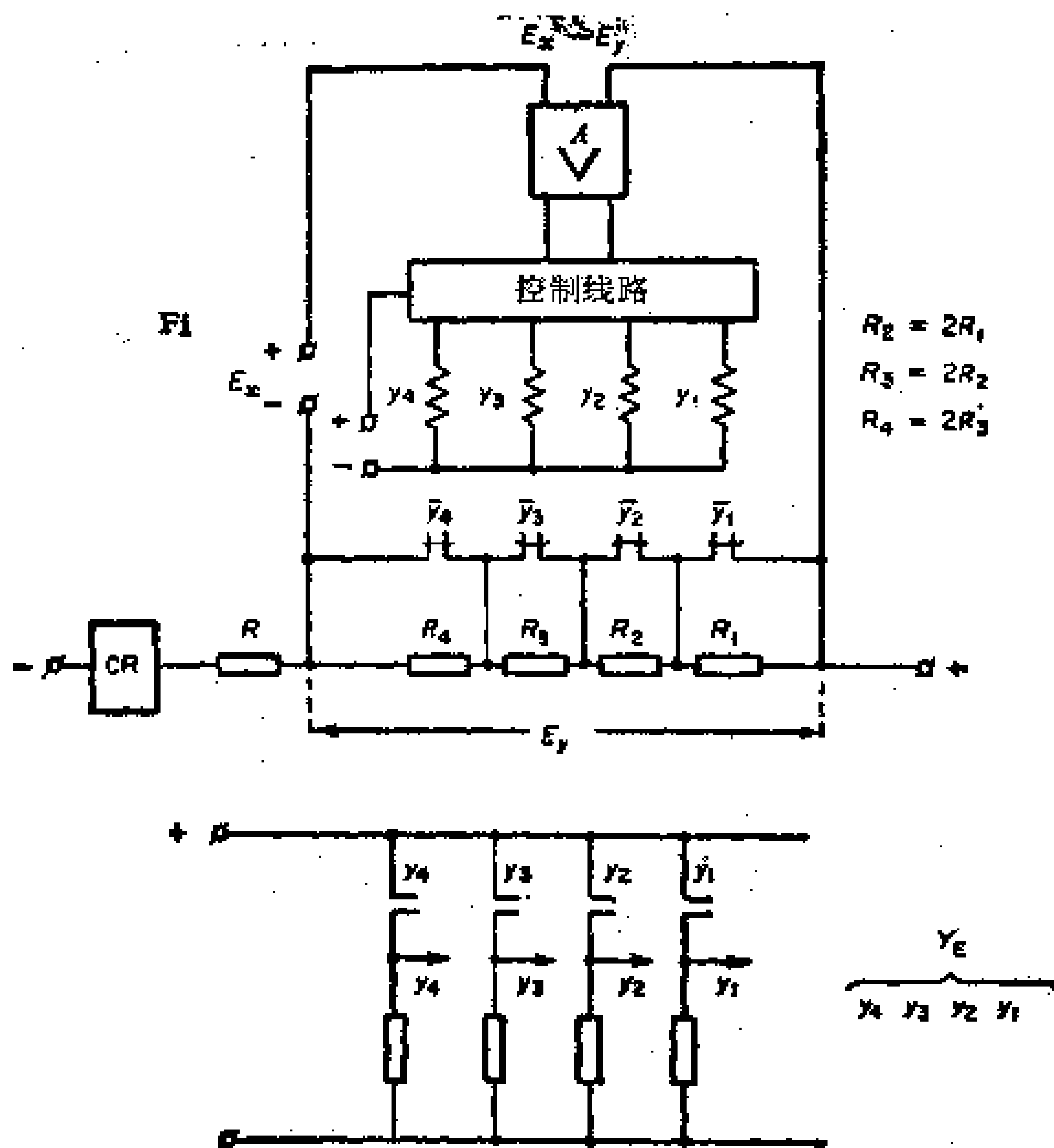


图 10.8. 把直流电压变换为二进制数的例

压 E_y 取得均衡。稳流器 CR 使通过电阻箱中的基准电阻的电流严格地保持恒定，电阻是这样选定的，使得通过每一个电阻的电压都是右邻电阻上电压的两倍。电压差 $E_x - E_y$ 经放大器 A 放大后作用到一个逻辑控制电路上，这个电路选择激励继电器 y_1，y_2，y_3，y_4 的这样一种组合，它使测量电路的不平衡 $E_x - E_y$ 达到最小。在输出处，我们得到一组信号 $y_E = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}$，它们用二进制码的形式表示了电压 E_x。这个数码的位数等于继电器个数，这是按可能和必要的变换精确度选定的。

打算引进机器的模拟量，常常表现为轴的转角 φ（例如仪表的运动系统的轴的转角、随动系统的输出轴的转角等）．现在，将这个角度变换为一个二进制数字码 y_φ，可以用一个编码盘来实现，如图 10.9 所示．编码盘上有一些圆环，表示码 y_φ 的偶数个二进制数字．最外面的一环分成一些小段，每段的角度大小确定最末尾的二进制数字的值 y_1．在所有相继的圆环上，各小段的角度大小依次加倍．黑色小段表示编码盘的导通区域，而白色小段表示覆盖有一层绝缘物质的区域．如果沿着盘的半径放置电刷并馈入电压 V［如图 10.9(b)所示］，那么各电刷上的电压就对应于盘的转角 φ 的二进制数 y_φ．

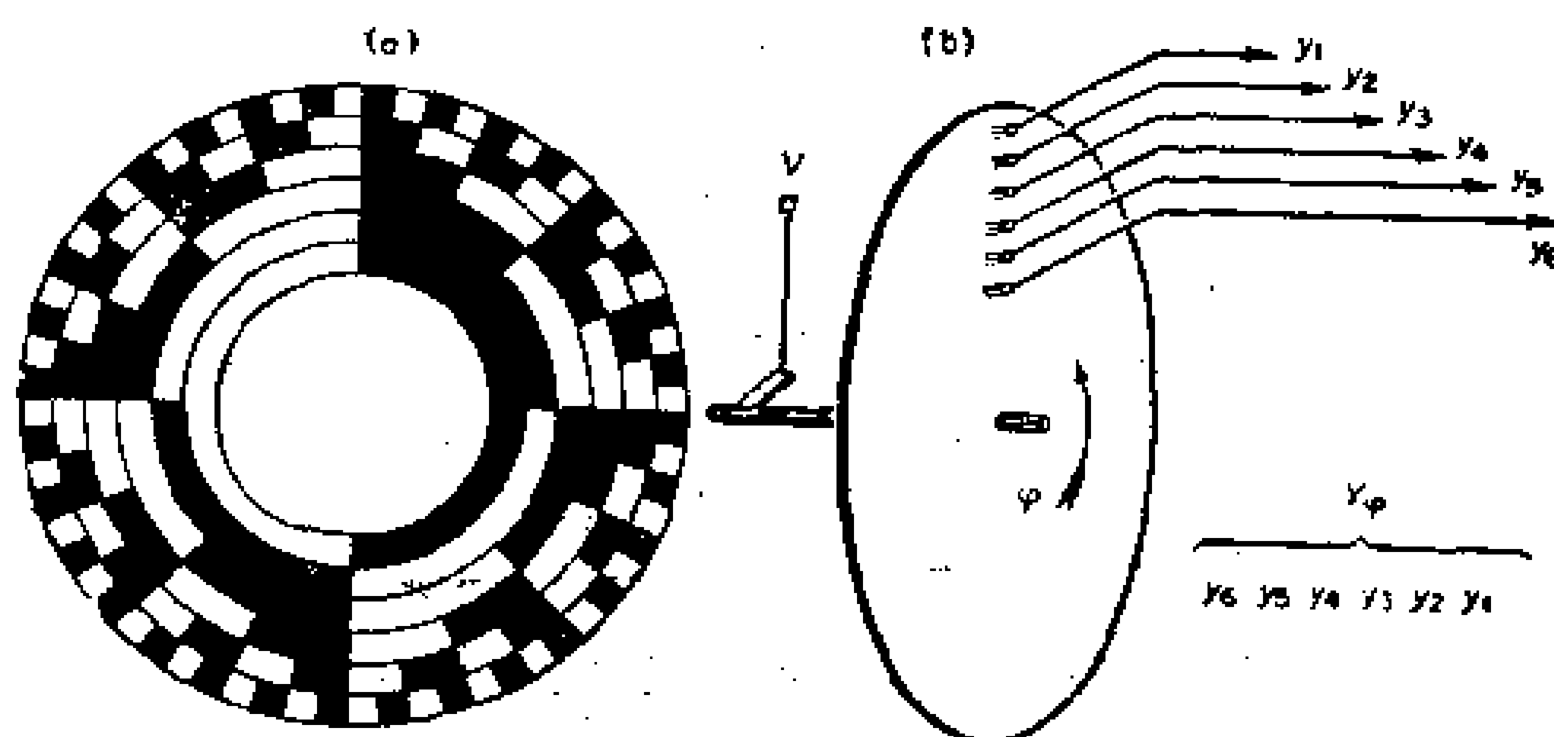


图 10.9．用模拟变换器把转角 φ 变换为二进制码的图．
(a) 编码盘；(b) 电子线路

为了把二进制数字码变换为模拟值，就要用到数字-模拟变换器．这种变换器的一个可能线路，用来把数 y_E 变为电压 E_y，如图 10.10 所示．这里，和上述模拟-数字变换器的方法一样，使用了电阻箱 R_1 — R_4，它是由一个稳流源 CS 馈电的．

为了在机器和外界之间变换信息，已经研制和使用着许多别的输入、输出装置．已有把运动和固定的图象、口头指令、关于被控系统状态的数据引入机器的设备．机器的输出

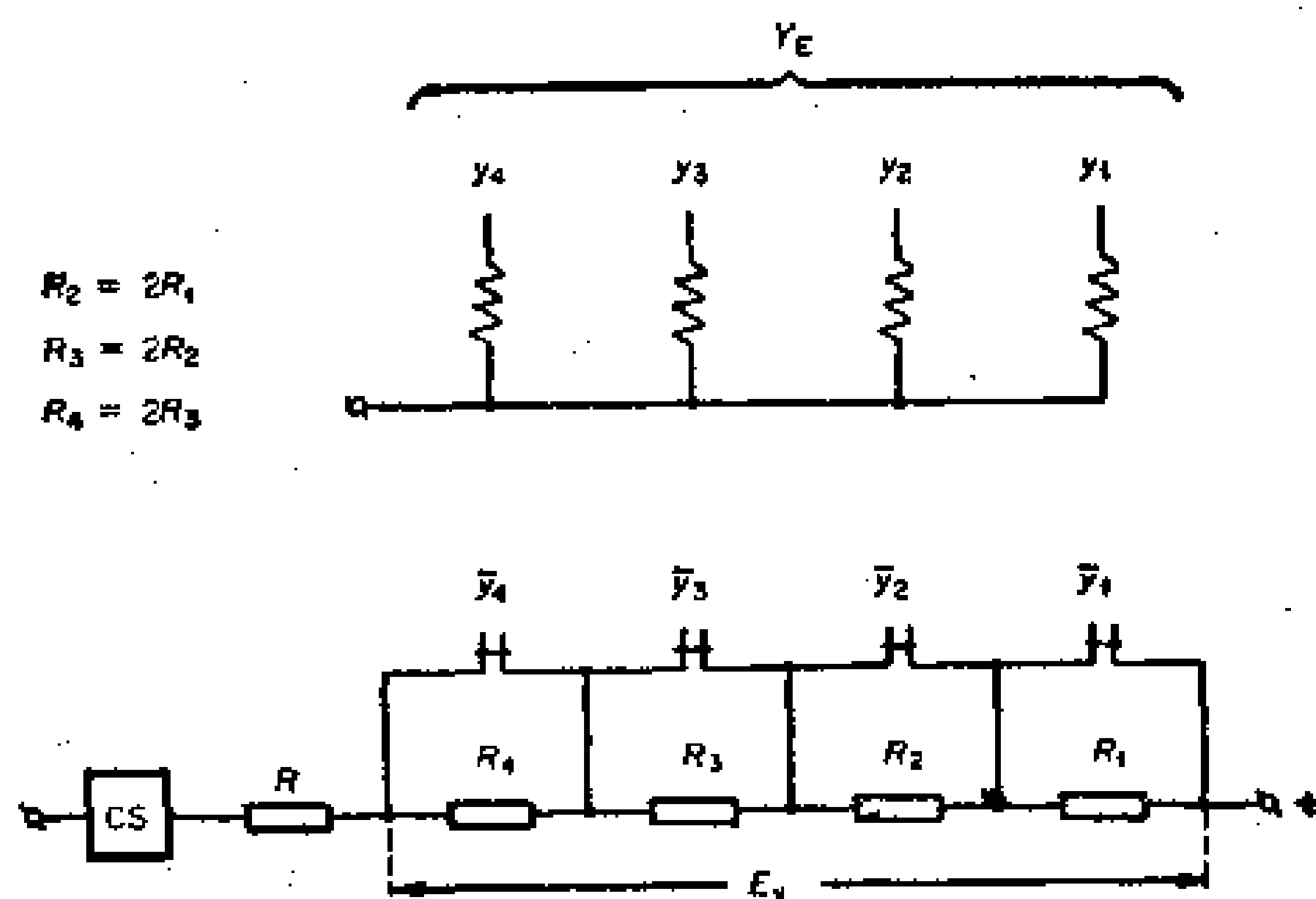


图 10.10. 用数字-模拟变换器把二进制数字变换为模拟量的例子. CS：稳流源

器则能够提供电信号、文字、图画和言语等形式的输出。

如果一台数字计算机是用来解决专门一类对象的过程控制问题的，而且配备有上述输入与输出器，那么它是能够直接同被控系统交换信号的。确实，控制计算机已成为现代工程的一项最显著的成就。

10.3. 控制计算机的应用

数字控制系统在工业中的应用大约是在150年之前开始的。法国发明家J. M. 扎伽（Jacquard）制造了一架织布机，它配备有简单的程序装置，在这个装置中有一张硬纸板，硬纸板上的洞，含有织物花样的编码，并保证了纱的交织；后来这项工艺被广泛地用于纺织工业。但是，数字控制系统的重要性和通用性，特别是对于各式各样的生产过程来说，只是到最近几年才实现；这已经开辟了一项崭新的工艺。

当前，在动力、工程、冶金、化学与食品等工业及铁路运输

中，数字控制系统正被用来直接控制生产过程。

现在举两个用数字系统直接控制生产过程的典型例子。

机床的数字程序控制。 在工程中，控制计算机使我们能够用原理上崭新的办法来制造元件：生产过程的自动化；防止元件形状与尺寸的不精确，这种不精确是由控制机床工作的操作者的误差所引起的；最大限度地减少熟练掌握新型元件生产所需的时间，以及制造工艺设备（例如冲模、钻模、仿形装置）的费用。

使用专用的控制计算机，就有可能实现机床的数字程序控制。在这种情况下，为生产所需形状毛坯用的刀具应有的所有运动，都是按存在机器存储器中的程序自动执行的。这个程序以编码形式包含有手工生产中绘在蓝图上的一切数据。图 10.11 表示了得到广泛使用的铣床数字程序控制线路。机器的存储器 1 是一条磁带（或穿孔带、电影胶片），上面记录有一列数字，它们表征刀具（图中是铣刀 7）在加工元件

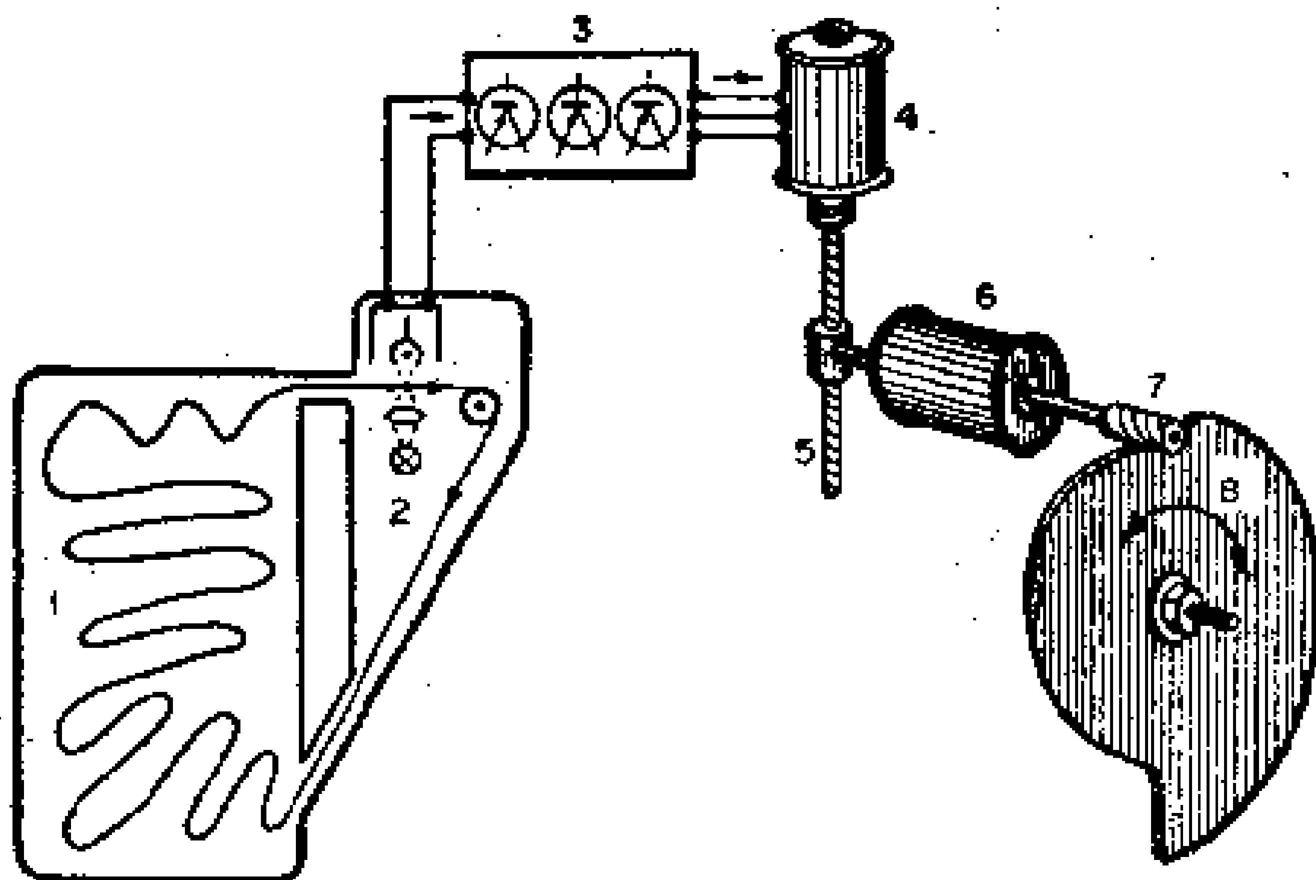


图 10.11. 数字程序控制铣床的图

8 时的所需位移．读出装置 2 和使毛坯位移的拖动装置协同工作，它接收记录在程序带上的信息，发出信号．这些信号指出刀具应有的运动方向、步数和每步的大小．控制装置 3 控制步进电机 4 的运动，后者确保实现铣刀的位移程序．步进电机的构造保证其绕组中每个电流脉冲使电机轴转过一个严格规定的角度．步进电机的运动通过丝杆 5 使拖动装置 6 和铣刀 7 移动一段路程，移动量与从送到步进电机绕组控制装置的脉冲数成正比．这样一来，旋转着的毛坯 8 的每一个位置，都对应着铣刀的一个特定位置，铣刀就按所要求轮廓的给定程序加工这个毛坯．

这个简单系统叫做单坐标系统，因为铣刀只是在一个方向上运动的．如果想扩大加工潜力，使之能加工外形复杂的工件或大型工件，那么可以使用双坐标甚至三坐标的系统．这种情况下，就要在带子上写下两个或三个程序，分别由两个或三个步进电机来执行，它们将使刀具沿相互垂直的几个方向运动．

金属切割的数字控制．现在已造出了一台专用数字计算机“СТАЛЬ-1”，用来实现热轧钢条联机切割的最优控制．

“СТАЛЬ-1”控制系统由下列几部分构成：确定钢条最优切割程序的控制部件、实现这一程序的剪刀和沿着轧钢机配置的一批传感器，如图 10.12 所示．

最优控制的一般过程如下：轧钢机产生长 L_i 的钢条（i 是被轧钢条系列型号的标号），现在把钢条用专用剪刀剪成长为 a_i 的坯件．我们允许把长度 a_i 减到 b_i，此外，最后一根坯件的长度 q_i 不应小于 c_i．长度 L_i 可在大范围里起伏，所以最后一根坯件常常会短于 c_i 而报废．我们的任务是保证所有坯件都在规定公差范围内．

长度 L_i 是不能直接测量的，因为剪刀是和轧辊并排放着

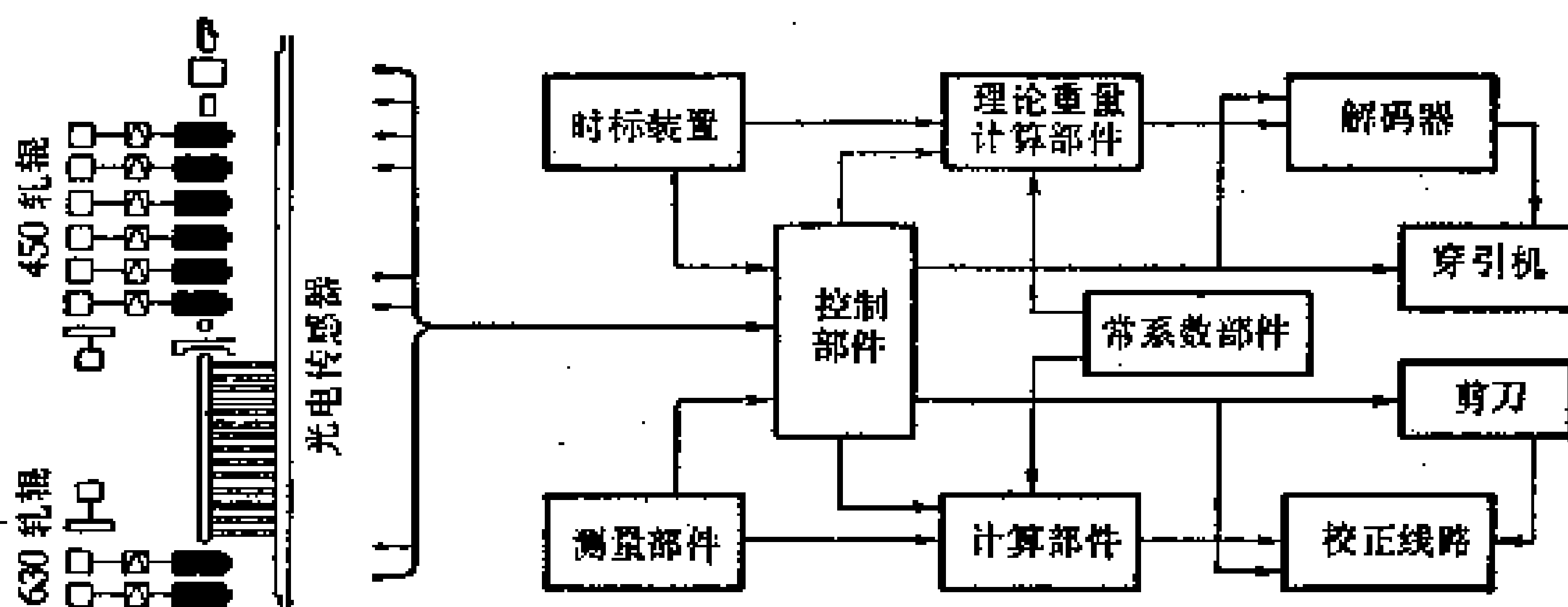


图 10.12. "СТАЛЬ-1"控制系统的框图

的，钢条一露出轧辊，就被剪切一次。

当有了毛坯料单，就确定常量 a_i，b_i，c_i 使之相协调。

由于铸锭重量有不同，加热期间有烧蚀，铸锭两头缺陷的修剪量有变化，所以目前的制造工艺并不能保证得到恒定的长度 L_i。轧制后的钢条长度，还取决于钢的等级、温度、截面以及一些难以掌握的其他因素。所以不但要求控制计算机来计算最优切割的程序，并根据这一程序控制剪床，还要求它预测长度 L_i。

由于热金属的参数很难测量，这个问题就更复杂了。

测定钢条进入轧辊前的长度 l_i，作为预测 L_i 的初值。l_i 可以方便地表示为 $l_i = a + h_i$，这里 a 是某一个恒定分量，而 h_i 是个可变分量，它可以在切割开始前进行测量。因为每根钢条的轧制速度是相当恒定的，所以对其长度的测量可由测量轧制时间来代替。值 h_i 是在记录器——具有一位加法器的移位器——中产生的，在记录器的第二个输入上，从计时装置馈入具有固定频率的脉冲，计时装置又是由来自彼此隔开一段距离 a 的传感器 A 和 B 的信号所控制的。当轧制开始时，由于来自传感器 A 的信号的触发，控制线路把计时装置（时间监视器）和记录器的加法器连接起来，等到钢条末端一

通过传感器 B，B 就发出一个信号，从而停止脉冲的计数。对应于长度 a_i 的数码也是这样产生的。对 l_i 进行测量和计算，就可以预测出各 L_i 的值，计算的根据是钢条进入和走出轧辊的总质量相等的规律。

最优切割方案是按记录在计算部件中的程序分两个阶段确定的。首先计算坯件数 z_i，知道 L_i 和定货单中规定的坯件长，就可以算出 z_i；再求出最后那根坯件的长度 q_i，以及应当加到最后坯件上去的长度 x_i，加上 x_i 是为了使最后那根坯件的长度能保持在公差范围内。然后，为了使最后一根坯件的长度 q_i 增加 x_i，计算那 z_i 个坯件每个必须缩短的最小长度。显然，如果每个坯件的长度缩短了一个"基数"(例如，缩短 m 毫米，如果机器的操作单位是 m 毫米的话)，那么 z_i 个坯件就省出了 z_i 个"基数"，从而最后一根坯件就增加这样大的长度。所以使用下列逐次计算值 r_k 的过程，就可以找到最优切割方案：

$$-x_i + z_i = r_0,\quad -x_i + 2z_i = r_1,\ \cdots,\ -x_i + nz_i = r_{n-1}.$$

如果某一个 $r_{n-2} < 0$ 而 $r_{n-1} > 0$，那么把前 r_{n-1} 个坯件缩短 $(n-1)x_i$，其他所有坯件缩短 nx_i，我们就得到无报废的切割，而每一坯件的长度缩短得最少。这一点不难验证。

依据计算出的 n 和 r_{n-1} 的值，计算机将把必需的控制数据馈给控制剪床的线路。

为了补偿剪床操作的不精确性，我们引入反馈：不断对算出的坯件长度和实际长度进行比较，并作出必要的校正。这台机器包含一个闭塞线路，当系统中发生任何误差时，这个线路就改变剪床的操作，使得切割出的长度为 a_j。同时发出一个存在误差的信号。

使用数字计算机来控制轧钢切割，就不能把控制职能和产品计数职能结合起来。计算机将计点所轧制的铸锭数目和

切出的坯件数目，把测出的长度换算为炉中所有铸锭的累计重量，然后将这些数据和其他的必要数据都记录下来，供工厂计算中心的计算机进一步处理。

使用"СТАЛЬ-1"控制计算机，使预制热轧材料的年产量增加了20000到25000吨。

这种控制计算机几乎可以省出一个月的生产。这就使我们获得一个使用类似的控制计算机可能达到巨大节约的概念。

10.4. 数字计算机的潜力

数字计算机的惊人的运算速度，它的多种目的的通用性，以及巨大的存储量，给全世界的人们以深刻的印象。控制论、数学和其他严密科学的专家们，对数字计算机的潜力和前景的估价，大体上是一致的。另一方面，不那么在行的人们，根据臆想和偏见，却抱有非常不同的见解。

一方面人们大大误解了控制论系统(包括人造的系统)的理论潜力和现代计算机的实际潜力之间的区别。关于使用数字计算机的一些例子的耸人听闻的报道，使人很难认识到，在造出一架象人一样能"思考"的机器之前，需要多么长期的和艰巨的努力。另一方面，有些人正试图在人造机器的潜力和人类思想的潜力之间，竖立一道不可逾越的壁垒。必须直截了当地指出，后面这种观点并没有什么科学根据，它纯粹是一种心理学的，而且是"坏"的心理学的解说："机器可以象人一样思考"的观念给予不能科学地思考的人们的困扰，正象他们的祖辈受到"人起源于猿猴"这一观念的困扰一样。

人类思维神秘论的拥护者并未察觉到，当他在说"人决无能力发展一种机器，它在智慧上超过人"时，他本身就轻视了思维的潜力。

这两种极端的观点，都妨害科学的判断，妨害解决涉及计算机今天和今后发展的许多重大问题，妨害应当获得的利益，也不利于理解计算机在社会生活的所有分支中作用的增长对人类造成的危险。由于数字计算机出现的结果，人类支配的力量起了变化，要正确地理解这些力量，在原理上和实践上，不仅应当考虑到它们的实际潜力，还应当考虑到它们受到的限制。

数字计算机的有效性在于它有能力克服在解决现代科学、工程和经济学问题时，遇到的一系列困难。最重要的一些困难如下：

(a) 大量的运算对解决许多重要问题都是需要的。因为解决这些问题的算法分出来的步数非常大。

例如，在天文学计算中，当确定宇宙飞船和卫星的轨道时，用局部地区的一些大地测量照片提供的数据绘制地图时，都遇到这种困难。

(b) 计算非常化时间。在一问题的很多不同解答中，如果要从中选择一个最优的解时，就是这样。这种问题发生在下列场合：选择最有利的桥梁设计方案，选择最有利的船体轮廓形状，选择最有利的机翼的翼型或涡轮叶片的形状。

(c) 必须加工大量数据。在下列问题中，例如加工统计数据，财务计算，加工供天气预报用的气象数据，就是这样。

(d) 迫切需要迅速地完成计算。这发生在要用问题的解答来控制迅速过程的场合，例如轧钢、化学反应器、战斗中飞机或舰艇的机动运动、宇宙航行。

(e) 解决一个问题时若干执行部件间应相协调。必须于有限时间内在一个中心解决复杂问题的情况，必须对大量的、表征控制庞大动力系统时所出现情况的数据加以考虑，防空系统和生产的操作系统中的决策，都属这类问题。显然，这种

类型的问题不能用增加操作人数来解决，因为这时任何一个人的决策，都不会对整体的情况加以全面考虑，而在实际上协调这些人的活动也是不可能的.

上述情况，使得某些问题用人力解决不仅困难，甚至是不可能的，从而促使人们使用计算机技术，而计算机技术由于反应很快，程序灵活，又容易使用并存储大量信息，所以在若干场合能确保有效地解决问题. 现在已为建立计算机体系创造了必要条件，它能交换信息，也能"集体"解决复杂问题，这样，数字计算机的潜力在近年来更增长了.

但是即使在这些条件下，计算机的潜力也不是无限的. 有一些限制在原则上是任何机器都难以克服的. 这意味着，对于任何人造的或自然的控制论系统来说，不管它们设计得多么完善，也存在着限制. 这些限制包括:

(a) 结果不可能产生在原因之前. 因果关系律是下述阿什比 (Ashby) 假设的基础.

"在高于随机选择的水平上实现有目的选择的任何系统，都是根据所得到的信息达到这一目的的". 就是说，在把问题表述出来、并把信息馈给一个能给出合理答案的机器之前，任何提供给机器的问题都得不到答案.

(b) 某些类型问题的算法的不可解性. 从美国数学家哥德尔 (Gödel) 和丘奇 (Church) 建立的定理以及图灵的工作可知，存在一些类型的问题，在原理上是不能建立有效算法的. 苏联数学家 A. A. 马尔柯夫 (Марков) 和 П. С. 诺维柯夫 (Новиков) 已给出了算法上不可解的问题的具体实例. 这些结果曾被一些科学家用作过分悲观地估价计算机的潜力的论据. 实际上，证明某些类型问题在算法上不可解，并不意味着这类问题的每一问题都是解不出的；倒不如说它意味着，存在着非常一般、非常广泛的一类问题，它们是不可能用一个算

法解决的.

(c) 计算机的速度限制. 因为计算机的运算包括有它的各部分间的信号交换，而信号从机器的一部分传到另一部分要化时间，所以计算机的运算速度受到信号传输时间的限制. 传输速度不能超过光速，元件之间的距离不能小于由制成这些元件的分子大小所确定的尺寸. 所以在机器中执行每个运算所需的时间，不能小于一个一定的、虽然是很小的有限值. 可能有人争辩说，这个限制是不重要的，但是实际上即使是现在，这个限制也大大地阻碍着计算机运算速度的增长.

显然对计算机解题的潜力所加的这些限制，也完全适用于人的潜力，人也不能超出由因果律、算法不可解性和反应速度这些限制所确定的极限. 所以如果预想某一类问题是机器绝对解不出的，那么这种预想要么是没有证实的，要么意味着这些问题也不是人所能解决的.

除了计算机的理论限制外，和解题的有效性这一自然要求相联系的实际限制，也是很重要的. 所谓有效性，我们首先理解为在一段可接受的时间内解决问题，其次理解为以一种便于使用的形式得到结果. 许多问题之所以在原则上不可解，因为它们要求计算机运算的次数是个天文学数字. 甚至一个看上去颇为简单的问题，象对有几百个控制作用的系统，通过完全扫描的方法来选择系统的一个最优体制时，要求选择的精度达到 1%，为了解决这个问题，即使用最快的计算机，也可能要运算几百万年，这显然是做不到的. 可能出现这种情况，一台计算机在一段可接受的时间内，给出了所寻求的解，但是其输出却是这样一种形式，它在实际上不能转换成便于使用的形式，例如，有时解是由大量数据组成的. 显然，得到无效的解，实际上等于不可解.

在实际应用机器来解复杂问题时所包含的困难，常常是

由于不能正确而清楚地提出问题．常常不容易确定，应当阐明的是什么，即我们到底希望机器做什么．

10.5. 计算机设计的模拟原理

在前几节中，我们几乎只讨论了数字计算机．还有另一种类型的计算机——模拟计算机．它们的作用不是基于加工表示数值数据的离散信号，而是基于为所研究的过程设计一个物理模型．这一点已在第三章中讲过了．例如，因为某种电路中的电流分布所服从的方程，和鼓风炉中的温度分布、流过飞机的气流中的压力分布以及其他一些有趣的过程所服从的方程是一样的，所以就可能造出一台模拟机，它以机器输出的电流值的形式，给出上述那些问题的数值解．但是，现代模拟计算机的潜力之所以落后于数字计算机，原因有两个．第一是这种机器的极为狭窄的“专门化”，它们通常只能解决极为有限的单一类型的问题．这个局限性非常难于消除，因为机器的职能“附着”于机器中的物理过程的性质，而以数字形式包含这一信息的计算机却没有这个缺点．第二个原因是模拟计算机所得到的解的精确度是很低的（通常不超过百分之零点几）．

有着非常有力的证据可以说，今后这个状况是会改变的，在计算机的发展中，模拟原理会起更重要的作用．显然，这种计算机用起来将和现代模拟计算机大不相同，最初它们的使用将和信息加工的数字方法有紧密的联系．

这个结论首先是从计算机的工作同人脑的工作相对比中得来的．数字计算机和大脑的类似性已证明是非常不完全的．已经发现，在大脑中模拟过程起着重要作用，信息多次地从数字到模拟、从模拟到数字，变换着形式．在大脑中表示数字数据的精度是很低的：量级为 10^{-2}到 10^{-3}．因为在连续进行运算时误差会大大增加，所以在大脑中连续运算的最大次数

——所谓信息加工的逻辑深度——不能很大．我们设这个逻辑深度的量级为 10．在现代数字计算机中，几乎所有运算都是依次进行的，所要求的精度要比大脑中高几百万倍，此外数字方式导致机器的各个元件的低负载．大脑的巨大能力、它的运算的高精度和高度可靠性，不是由进行各次运算的反应速度、精度和可靠性来达到的，靠的是能平行加工信息的极为复杂的机构，以及信息的特殊表示形式，它能把数字原理和模拟原理结合在一起．例如，信息并不是表示在脉冲序列的精确形式之中，而是表示在这一序列的统计性质之中．这一切考虑都为 J. 冯·诺伊曼（J. von Neumann）概括为一句名言："大脑的语言不是数学语言．"控制论仍需要学习说大脑的语言．

问题的另一个范围涉及下列考虑．我们知道，用数字形式解决这样的复杂问题，如求多变量函数的极大值，也将对计算机的运算量和存储量提出难以满足的要求．例如，如果要求一台计算机，在一切可能的 n 个二位制变量的布尔函数中求出某一个函数时，我们将发现，即使对于 $n=100$，需要的存储单元数量也将超过太平洋中的原子数，即使计算机以每秒 10^{12} 次运算的速度进行运算（这比最好的现有现代计算机快几百万倍），持续计算时间也将超过地球的年龄．另一方面，最简单的物理系统却在每一步都能更轻易地、更快地解出"费力"得多的问题，例如，用一光束寻求光线在非均匀光介质中的最快传播路径，或者用一个容器里的气体，让它从非平衡态变到平衡态而求出最大熵——一个有着天文学数字那么多变量的复杂函数．显然，这个问题只能用"模拟"方式来解决，这里该系统的所有分子实质上都起着平行工作的"计算元件"的作用．在控制论设备中，使用相似过程的概念，是非常诱人的．在活机体中，每个细胞里都出现严格有序的过程，这种例子指

明，原则上这种概念是有可能实现的。

这个领域中最早的尝试是英国科学家戈登·帕斯克(Gorden Pask)和斯塔福德·比尔(Stafford Beer)的工作。他们制造了一种含有绿矾(硫酸亚铁)的胶质溶液，在溶液中放进了一些放大器和用来馈送电输入脉冲的铂电极。结果在溶液中长出了金属纤维须，它的外形取决于输入信号，也取决于系统"以前的历史"(由于反馈的作用)。这个简单系统揭示了一些极有趣而意想不到的性质，它能够"解出"含有几十个方程的非常烦琐的线性齐次方程组。已经证明，它能够学习，也能够适应环境和输入作用。特别是可以教会它以一定方式对介质的各个区域的酸度变化、对磁场的各种分布以及对振荡作出反应。除此之外，还能教会这个系统比较快地对声音作出反应，并区分各种频率的声音(50赫兹和100赫兹)。在这个系统中长出了一个"耳朵"，它含有能对特殊频率谐振的纤维须。这种研究的前景是诱人的。

练习

1. 在计算机中，通常都是用一种不自然的方式来做减法的，这种方法也可以用于十进制。按照这种方法，减去一个数变成加上这个减数的所谓补数。例如，如果需要计算差1340－864＝476，那么我们就求出减数的(对于1000来说的)补数等于136，然后做加法：

$$\begin{array}{r} 1340 \\ +\ 136 \\ \hline 1476 \end{array}$$

可以看出，这样得到的结果，和原来得到的差相比，最高位上差了一个单位。在读出结果时就把它抛弃了。在二进制形式下，可以用下面这一简单法则来确定补数：应当以数字的右面最后一个1之前为界，把这个数字分成两部分，右边部

分一点都不变，而左边部分则把 0 换为 1，1 换为 0. 例如把数 1001101110 分为两部分：10011011/10，然后我们得到补数：0110010010.

使用补数形式做下列减法：

(a) 101101 − 10110　(b) 1001110111 − 0001111100

(c) 111100000101 − 101110100010　(d) 100011110 − 10000

把这些二进制数换成十进制数来检验你的结果.

解：(a)

```
   101101   即    45
 + 001010       − 22
 --------       ----
   110111         23
```

(b)

```
   1001110111   即    631
 + 1110000100       − 124
 ------------       -----
  10111111011         507
```

(c)

```
   111100000101   即   3845
 + 010001011110      − 2978
 --------------      ------
  1001101100011         867
```

(d)

```
   100011110   即   286
 + 111100000       −  32
 -----------       -----
  1011111110         254
```

2. 图 10.9 中所示的编码盘，相对于电刷来说，在某些旋转角处，可能会产生大错误. 例如，如果旋转角 φ 是这样的，在变换器输出处出现的六位数字每位数字都是 1，那么再向右旋转一个小角度就会产生大错误，因为电刷不可能排列得很理想，所以它们不可能同时地移出扇形区域. 因此常常把码作得与二进制码不同. 例如，可以使用这样一种码，表 10.2 给出了它的前十个数字.

表 10.2

十进制数	二进制数	码	十进制数	二进制数	码
0	0000	0000	6	0110	0101
1	0001	0001	7	0111	0100
2	0010	0011	8	1000	1100
3	0011	0010	9	1001	1101
4	0100	0110	10	1010	1111
5	0101	0111			

画出能实现这种码的编码盘(或编码鼓).

当读出这种码时，试估计由于电刷非同时接触所引起的最大可能错误是多少?

解：图 10.13 给出了格雷（Grey）码的编码盘(格雷码就是表 10.2 中所写的码的名称)。从表 10.2 中可以看到，在格雷码中从一个数变到下一个数时只变动一个数字，所以最大读出误差不超过 ±1 个数字。

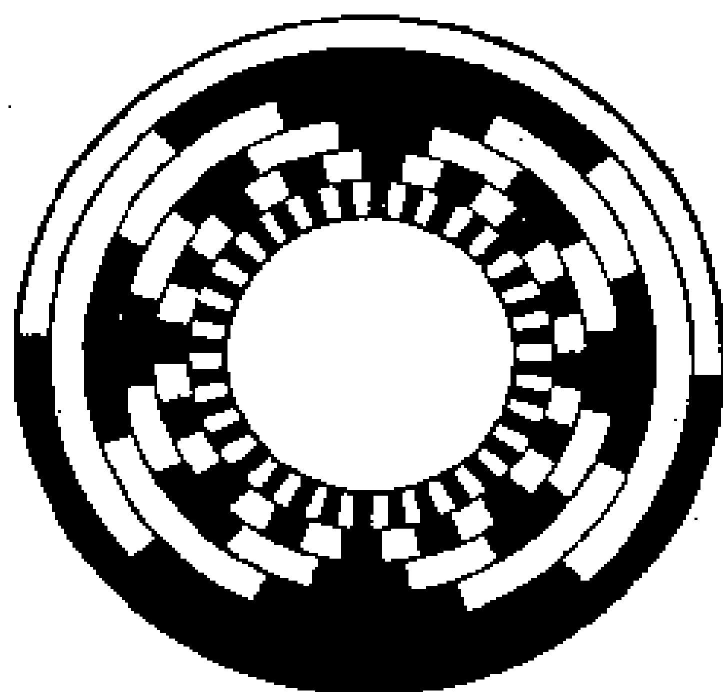


图 10.13.（第 2 题）

3. 欲设计一个如图 10.10 所示类型的数字-模拟变换器，为保证 0.2% 的变换精度，需要多少继电器?

解：9 个继电器，这时变换精度将等于 $2^{-9}<0.2\%$。

第十一章　适　　应

观察存在于自然界的大批高度有组织的系统，观察它们对环境变化的适应性、它们的发展和自再生，这一切使我们相信，所有这些引人注目的现象的基础是某个有认识力的机构，它赋予这些系统以这样的性质，使这些系统的秩序和有组织状态不仅不丧失，而且还随时间的推移不断地增长。这种系统的形成和发展，无疑最辉煌地显示了自然界的创造力。

高度有组织的系统的起源，可以用下面这一事实来说明，在各种元素的大量随机组合之中，迟早将发生这样一些组合，它们对周围环境的适应程度至少足以维持其生存，即这意味着，它们有能力将其组织结构维持在稳定状态之中。但是，不能设想一个系统的发展从一开始就如此完美，以致当外界状况以这样那样方式变化时，它们都显示出具有最优的、至少是容许的行为。当发生使机体不能选择所需反应的情况时，要维持一个系统的生存能力，就必须改变这个系统的结构及其行为的方式，并改变这个系统对扰动作出反应的本性。

改变一个系统的性质，使它能在变化着的环境下达到最好的、至少是容许的职能的过程叫做适应。

对自然的适应过程的基本特征，至今还很少研究，但是在建造能适应的模型方面已经有了一些成绩，虽然是以非常粗糙的、简化的方式造出的。这些自组织系统的模型给出了一个观念：有可能形成自然的结构，它们能够维持自己的有组织的状态，也有能力产生使自己能适应变化着的环境的行为。

适应的性质清楚地表现在体内平衡机构中. 亦即，活机体有能力把它们的最重要的变量维持在容许的生理范围内，即令机体所生存的环境发生了相当大的变化. 可以举温血动物的反应随温度变化而变化为例，来说明体内平衡机构的适应性. 在比较低的温度下，动物是这样调节体温的：改变体表组织的血流量以保证身体与环境之间的最优热传导条件. 另一方面，如果环境的温度高了，体温控制是借出汗和呼吸以保证充分释放过剩的热量而实现的. 温血动物就用这种方式使自己适应其环境条件的变化——它适应并改变自己的行为，以保证实现稳态，在这个例子中就是尽力把体温保持在容许范围内.

人造控制系统通常是在变化很大的条件下工作的，为了保证它们有效地起作用，人们就试用一种类似于在自然界里发展起来的适应机构. 要使技术的或经济的控制系统适应环境条件的变化，可以用各种方法来选择这种系统的工作条件. 工作条件的变化可能是环境的变化，也可能是控制系统的各部分的性质和特征的变化. 系统的最有利的工作条件可以是、而且常常是用探索法来选择的.

11.1. 选择最合适的体制

为了使系统正常地发挥其职能，决定其工作条件的那些量，都不得超出容许值的范围. 例如，为了保持动物的生存条件，象体温、血液中氧和葡萄糖的成分等，就必须保持在容许范围内；为了使蒸汽锅炉正常工作，就必须把蒸汽的压力和温度、锅炉中的水位和进水温度保持在容许范围内.

让我们把可获得的、表征系统工作体制的值，记为 R_1, R_2, $\cdots$, R_n.

在最简单的场合，系统的工作体制的极限值不依赖于系

统的工作条件，这些极限可以写为

$$R_1' \leqslant R_1 \leqslant R_1'', R_2' \leqslant R_2 \leqslant R_2'', \cdots, R_n' \leqslant R_n \leqslant R_n'', \quad (11.1)$$

这里单撇符号表示最小容许工作值，双撇符号表示最大容许工作值.

在系统的工作条件空间中，沿着它的坐标轴表示工作值，选出一个D区域（n维长方体）来表示不等式组(11.1)，在这个区域内必然有一点表示系统的工作条件．显然，控制系统总应当使工作值保持在其变化范围内，这就保证了代表点位于D区域内．但是这并不是控制问题的全部，因为在D区域内的点不是在各方面都等价的.

系统的每个体制都对应着有效性判据α的一个特定值，它表征每个体制与控制目的的符合程速．对于活机体来说，判据α可以确定它们的生存概率或发育程度；对于蒸汽锅炉来说，判据α可以是效率或用蒸汽来表示的生产率；对于运输系统来说，则可以是运费收入或运费的吨公里数．我们将在D区域的每个点处标明α值，并把具有同一个α值的点都连起来，就象在图11.1中对于二维的工作条件空间已作出的那样.

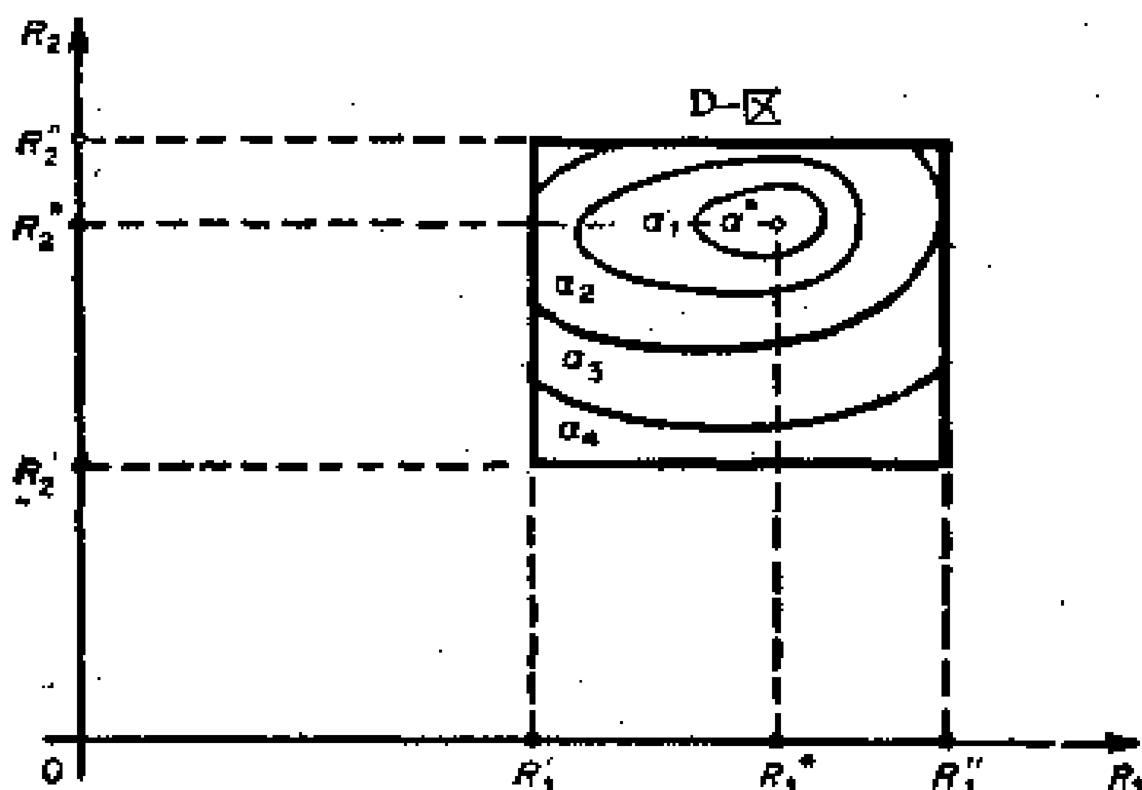


图11.1．在系统的体制空间里的α等值曲线

如果 α 的最有利的值是 α 的最大值，那么系统的最有利的工作条件将是由点 α^* 表示的工作条件，这时控制系统的任务可能是确定工作值 $R_1^*, R_2^*, \cdots, R_n^*$，这些值确保最有利的有效性判据 $\alpha=\alpha^*$. 如果系统的条件的变化，并不引起点 α^* 的坐标的重大变化，这就是按第七章所讲方法用一个适当的镇定系统解决了的问题. 但是如果在系统工作期间，点 α^* 的位置发生变化，而变化的方式又是不能预知的，那么控制问题就变得更复杂了.

控制系统总是应当确定这样的工作值 $R_1^*, R_2^*, \cdots, R_n^*$，对于这些值来说，在符合加给工作值的限制的条件下，α 将取最有利的值 α^*，而不管点 α^* 的位置是怎样改变的.

例如，设被控对象是对钢管 T 进行热处理的连续炉 F，如图 11.2 所示. 这个装置的工作体制，是由该炉工作空间中的温度 τ_n 和钢管的运动速度 v 确定的. 我们将把每吨热处理材料在炉中消耗的燃料 q，看作这个装置的有效性判据

$$\alpha=\frac{q}{rv}=\min_{v,\tau_n}, \tag{11.2}$$

这里 r 是钢管的每米重. 在这个例子中，必须使 α 对于 v 和 τ_n 取极小值，即容许的 v 和 τ_n 的值必须这样选定，使 α 取最小可能值.

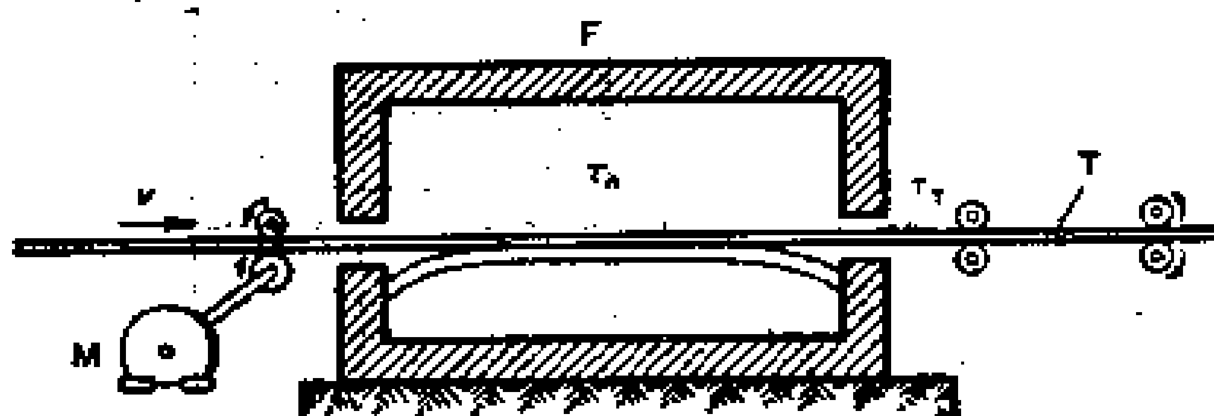


图 11.2. 对钢管进行热处理的连续炉
M——推进钢管的电动机，F——炉子，T——钢管

在本例中，D区域的边界由下列条件确定：

速度限制

$$v' \leqslant v \leqslant v'', \tag{11.3}$$

这里 v' 是保证该装置具有所需生产能力的钢管运动的最小容许速度，而 v'' 是由拖动装置产生的最大速度.

温度限制

$$k'v \leqslant \tau_n \leqslant k''v, \tag{11.4}$$

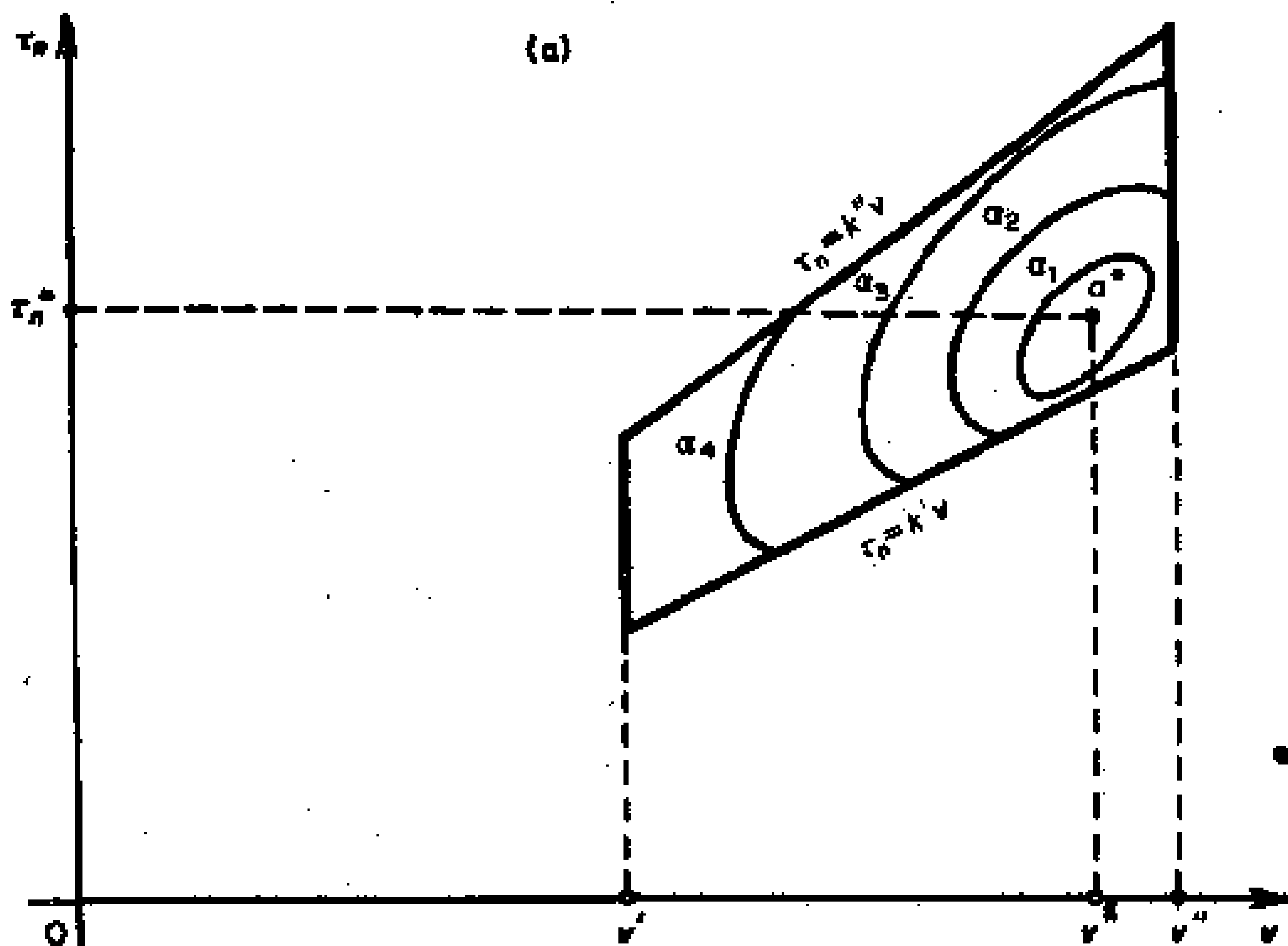
这里系数 k' 和 k'' 确定炉内温度和钢管运动速度之间的允许比值，它们将分别保证在炉子出口处钢管的最小和最大容许温度 τ_T. 在工作条件 v, τ_n 的空间中，这样确定的D区域如图11.3所示，它还包含 α = 常数的线. 最有利的 $\alpha = \alpha^*$ 在这里对应于坐标为 (v^*, τ_n^*) 的点. 这两张图分别表示了D区域的边界和 α 等值线的分布，图11.3(a)是厚壁管情况，图11.3(b)是薄壁管情况.

因为在控制系统中，没有引入关于等值线形状的信息，也没有引入关于最有利的工作条件值的信息（它们在事先通常是不知道的），所以必须凭经验不断摸索并对各种容许体制进行比较来选出最有利的体制.

为了组织有效的探索，以求出最有利的工作条件，已经提出了一些策略. 我们介绍其中的几个.

扫描法 这是最原始的、但也是最简单可靠的探索法. 它连续地试探所有的不同体制.

在用扫描法进行探索时，我们把D区域分为 N 个部分，对它们进行测量后，其大小分别等于 $\Delta R_1, \Delta R_2, \cdots, \Delta R_n$，这些量根据确定工作条件所需的精度而选定. 通过相继确定工作值，使得代表点保持在各部分中，并记忆每部分的 α 值，这样就有可能在扫描过程终止时，选择出这样一组工作值，它对应于有效性判据的最有利值 α^*. 单元 N 的个数，由以所需精度保证工作体制的离散工作值的个数 $m_1, m_2, \cdots, m_n$ 确定：



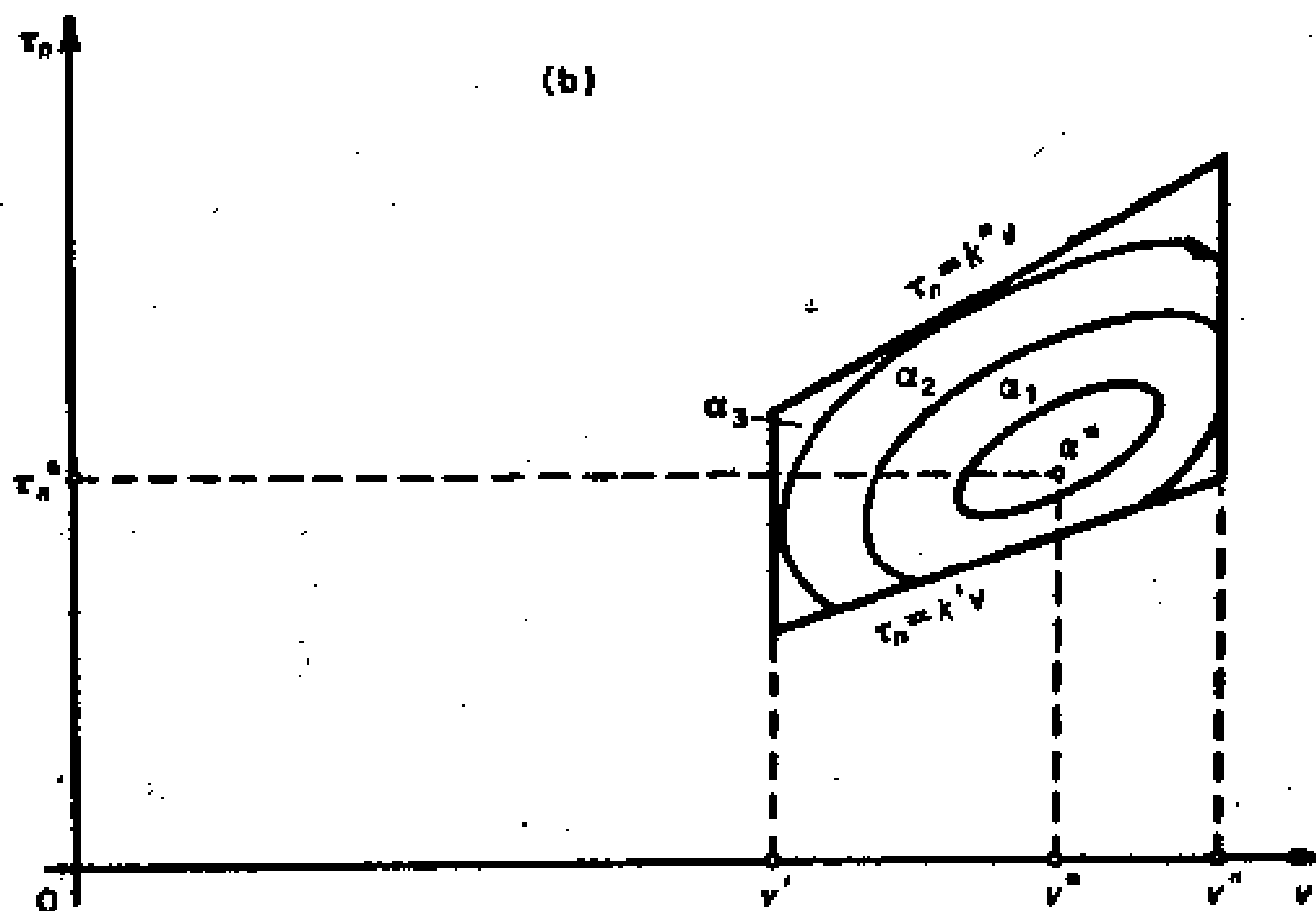


图 11.3. 判据 α 的等值线：(a) 对厚壁管情况；(b) 对薄壁管情况

$$N = m_1 m_2 \cdots m_n.$$

如果 $m_1 = m_2 = \cdots = m_n = m$, 那么

$$N = m^n. \tag{11.5}$$

现在我们来估计用扫描法选择一种体制所需的时间. 对于钢管热处理这个例子来说,设 $m = 20$(5% 的精度, $n = 2$), 我们得到 $N = 20^2 = 400$.

为了确定工作值,工作条件每一次变化后,应当在一定时间 T_0 内保持常值不再变化,仅在这以后才估计 α 的值. 对于我们考察的这个过程来说, 时间 T_0 不能小于 1 分钟. 因此探索时间的数量级将是

$$T_n = NT_0 = 400 \text{ 分钟}.$$

这样长的时间显然是不能接受的,因为在通常情况下,这些应予处理的钢管每隔二到三小时就要更换一批.

如果我们对于一个由 10 个工作量表征的过程,要通过扫描来选择最有利的体制 (以 1% 的精度), 那么即使每一步只化一秒钟,根据 (11.5) 式,我们也需要

$$N = 100^{10} \text{ 步},$$

探索时间就是

$$T_n = 100^{10} \text{ 秒} \approx 3 \cdot 10^{12} \text{ 年},$$

即超过地球年龄. 显然,只要系统稍微复杂一点,扫描法进行探索就不适用了. 下面所述的探索法要有效得多.

高斯-塞德尔 (Gauss-Seidel) 法　我们假定必须求出这样的 v 和 τ, 它们使得在 D 区域里的 α 最小, 如图 11.4 所示, 这里点 a_{in} 表示初始条件. 用高斯-塞德尔法,我们把 v_{in} 增加 Δv, 检验 α 在哪个方向上发生了改变, 然后选择使 α 值减小的方向. 我们每一步都在 v 值上增加 Δv,同时每次都验证 α 是否都真正减少了. 如果在点 a_1 处 v 的变化不再造成 α 的降低,就以同样方式沿坐标 τ 开始运动,直到达到使 α 不再减少

的点 a_2，然后沿 v 轴重复这一过程、直到建立这样一个体制 a^*、使得 v 变化 $\pm\Delta v$ 或 τ 变化 $\pm\Delta\tau$ 都不进一步使 α 减少。为了到达 α^* 的邻域需要的步数，取决于 α 对系统工作值的依赖关系的性质以及初始条件，但是步数的数量级可粗略估计为

$$N = m \cdot n. \tag{11.6}$$

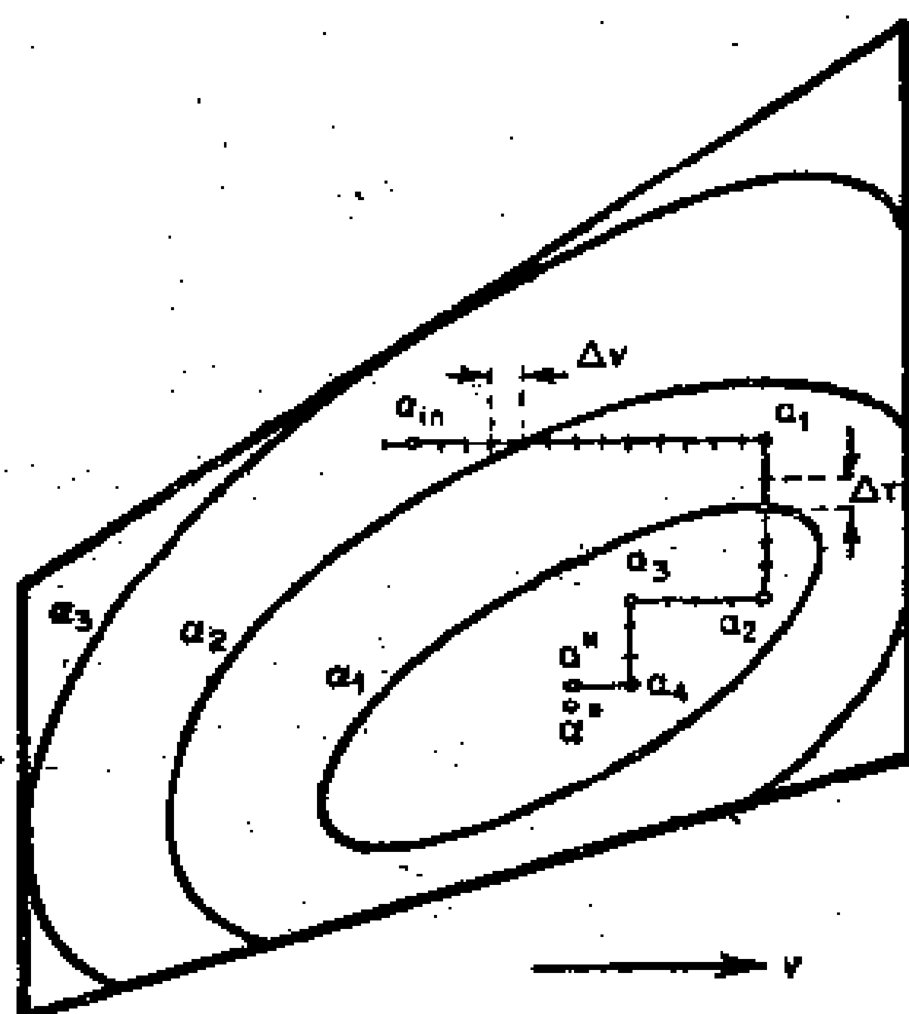


图 11.4. 用高斯-塞德尔法进行探索

对于 $m = 20$，$n = 2$，$T_\omega = 1$ 分钟的炉子来说，我们求出探索时间是

$$T_s = mnT_\omega = 20 \cdot 2 \cdot 1 = 40 \text{ 分钟}.$$

这比扫描时间少一个数量级，而对于上面所举的 $m = 100$，$n = 10$，$T_\omega = 1$ 秒的例子来说，

$$T_s = 100 \cdot 10 \cdot 1 = 1000 \text{ 秒} \approx 0.3 \text{ 小时},$$

而不是扫描法探索所需的 $T_s = 3 \cdot 10^{12}$ 年。

如果我们使用这样的方法，其原理是在所需方向同时变化 n 个工作条件［最陡下降法(图 11.5)，梯度法，峡谷法］，那

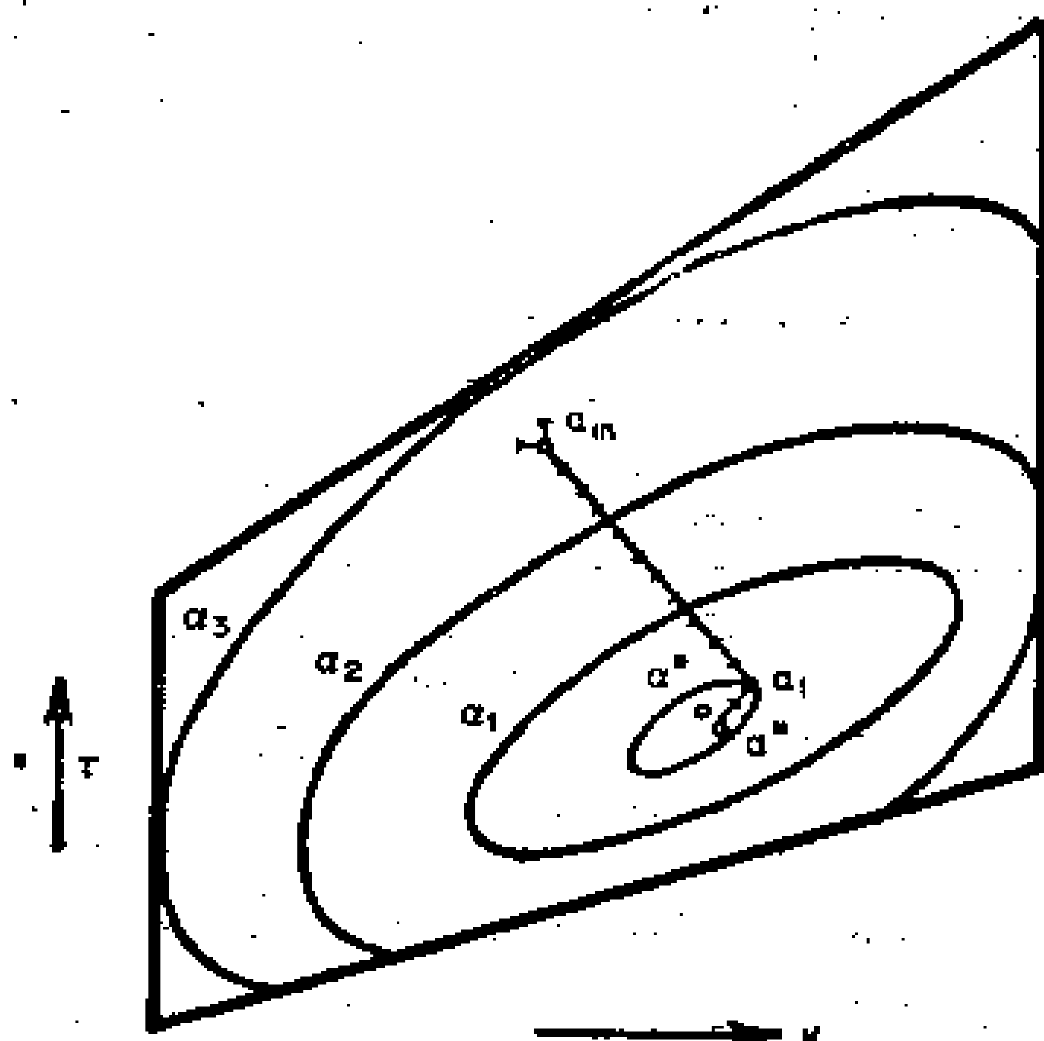


图 11.5. 用最陡下降法进行探索

么甚至可以更大地缩短探索时间。

不仅是选择最合适条件的问题，而且还有其他许多问题，例如：确定变压器、电动机或发电机的尺寸，选择供水、供电或供气系统的最优配置，制定工厂的最优生产计划，都可以归结为求多变量函数的极值问题，然后用上述探索策略来解决。

11.2. 适应自动机

在自动机中，即使完全没有引进关于介质性质的信息，它也可以具有适应性，只要在自动机和介质之间存在一定的相互作用。

作为这种自动机的最简单的例子，我们来看某个具有一个输入 x 和一个输出 y 的自动机 A，它可以取 z_0 和 z_1 这两种状态之一。我们假定，在自动机的输入 x 上，馈入一个依赖于输出 y 的随机介质的反作用。设 x 和 y 只可能是 0 或 1，这

里 $x=1$ 意味着"处罚"这台自动机，而 $x=0$ 则意味着"不处罚"(奖励)． 图 11.6 画出了对于 $x=1$ 和 $x=0$ 的自动机的转换图． 从这张图可以看出，自动机是这样设计的，它在"处罚"情况下就改变自己的状态．自动机的输出明显地取决于它的状态．设在状态 z_0 中 $y=0$，在状态 z_1 中 $y=1$． 介质的性质，可由对各种输出值的"处罚"概率值来表示，如表 11.1 所示．

表 11.1

	$y=1$	$y=0$
$x=1$	p_1	p_0
$x=0$	$1-p_1$	$1-p_0$

如果自动机总是以相同的概率转换为各状态，而与介质的反应无关，那么在若干周期里"处罚"的平均数，就是在自动机的每一状态下受到处罚的概率的算术平均值．这时一个处罚的概率(换句话说，在一个周期中的平均处罚数)就等于

$$p_m=\frac{p_0+p_1}{2}. \tag{11.7}$$

如果自动机从一个状态到另一个状态的转移依赖于介质的反应，那么处罚的概率就会降低． 下列事实可以解释处罚概率的减少：如果自动机的转移图如图 11.6 所示，那么它将更经常地处在这样的状态下，这时它更不大象将受到"处罚"的样子． 可以证明，对于要确定它自己所在的每一状态的自动机 A 来说，所有最终(稳态)的概率是存在的，这与自动机 A 的初态无关，它只取决于自动机 A 的结构和介质的性质．

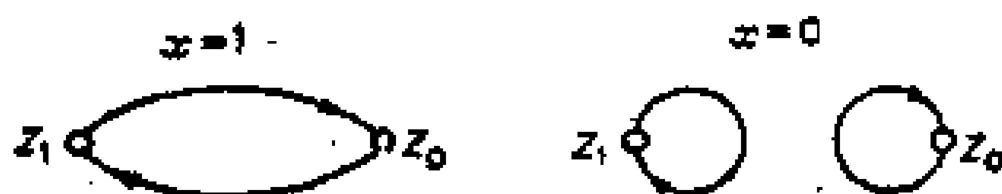


图 11.6． 自动机 A 的转移图

利用最终概率状态，就可以确定最终处罚概率．

对于如图 11.6 所示的自动机，处于状态 z_0 和 z_1 的最终

概率分别是

$$r_0 = \frac{p_1}{p_0 + p_1} \quad 和 \quad r_1 = \frac{p_0}{p_0 + p_1},$$

而处罚的概率等于

$$p_{罚}^* = p_0 r_0 + p_1 r_1 = \frac{2p_0 p_1}{p_0 + p_1} \leqslant \frac{p_0 + p_1}{2}. \qquad (11.8)$$

当 $p_0 = 0.9$, $p_1 = 0.1$ 时，按公式(11.7)，处罚的概率将等于 $p_{罚} = 0.5$，而按公式(11.8)，$p_{罚} = 0.18$.

可以看出，即使是这台原始的自动机，在随机介质中，它在一定意义上也是能够适宜地行动的。这个性质是设计自动机时未曾考虑的。

应当指出，上述自动机可以借助于一个普通的触发器来实现，对这个触发器来说，“处罚”就是在其输入处收到一个能引起触发器转换的脉冲。

即使介质的性质随时间改变，只要把自动机设计得复杂一些，例如增加状态的个数，也可以获得对介质的高度适应性.

11.3. 体内平衡器

模拟活机体的适应特性、它对变化着的介质条件的适应性的第一个人工模型是英国科学家 R. 阿什比制成的.因为这个模型的行为，在一定程度上类似于以体内平衡现象表示出来的活机体的行为，所以它被叫做体内平衡器. 为了使自己的主要变量能保持在那些由身体的生理特性决定的容许范围之内，活机体对周围介质的变化作出反应，和这完全相似，体内平衡器也对其工作条件的任何变化作出反应，它产生的作用使其主要坐标保持在容许的范围之内.

阿什比体内平衡器由四个主要部分组成，每一部分都含有一个具有四个测量线圈的磁电仪器. 每个仪器的运动系统

都可以移动一个电位器的滑块，电位器则连在所有四个仪器的线圈电路上。结果每个仪器的运动系统的位置都依赖于其他三个仪器的运动系统的位置。 连接起来的仪器 *I*1—*I*4 构成一个动力学系统 S（图 11.7）。 对于这个运动系统的中间位置的任何组合来说，系统可以是稳定的，也可以是不稳定的，这取决于它的参数值(测量线圈电路中的电阻)。在系统 S 上连有一个控制装置 Q，它包含继电器 R 和四个分段开关 s1—s4。当有一个运动系统达到了它的极端位置时，这个继电器就受到激励。这时，开关 s1—s4 就开始运动，并通过改变线圈的电阻来改变系统 S 的参数。如果在参数的各种组合中，确实有一个组合能使系统 S 稳定，那么装置 Q 就一直改变它的参数，直到这样一种组合被找到为止。此后，就没有一个仪器的运动系统会达到极限位置了，于是继电器将不再被激励，所以分段开关也就不动了。

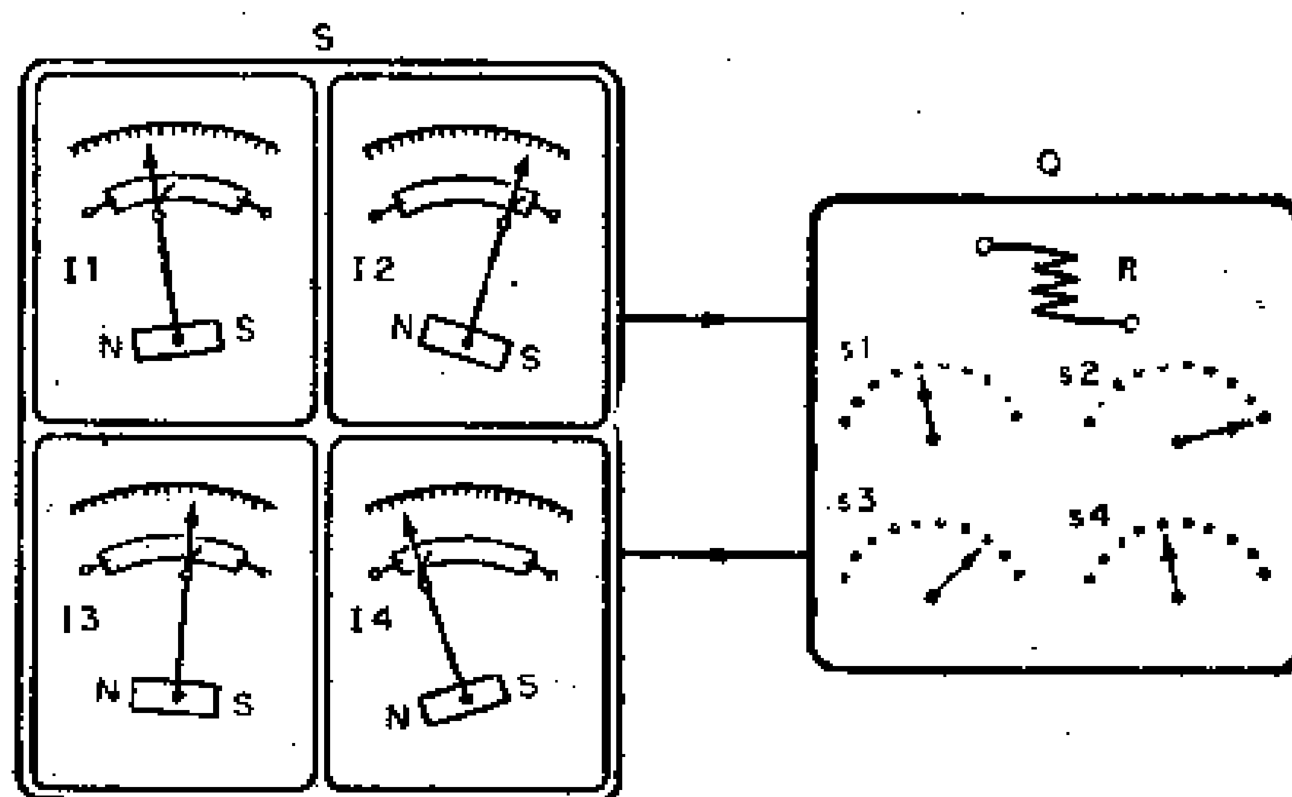


图 11.7. 阿什比体内平衡器模型

如果系统所找到的稳态被它的参数的任何变化所扰乱，仪器的运动系统将达到它们的极限位置，而控制装置 Q 也将再开始探索参数的那个确保系统 S 稳定性的新组合。

图 11.8 给出了这种系统［但实际上是一个更简单的系统（二阶系统）］的一个可能的运动轨迹。

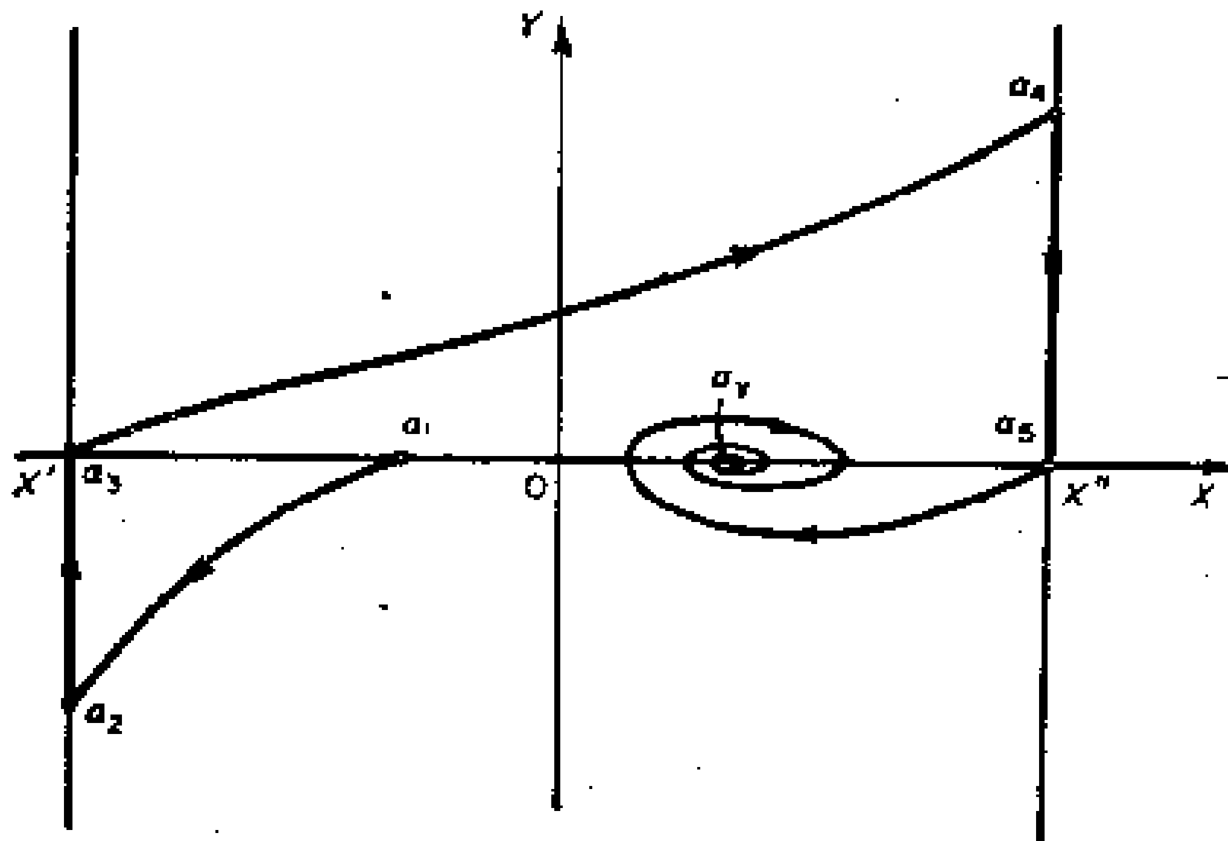


图 11.8. 体内平衡器的轨迹

图中系统的位置 X 可以在

$$X' \leqslant X \leqslant X''$$

范围内变化，这个范围决定于限位销钉。当碰上限位销钉后，系统的位置就不再变化了——它的速度 y 变到 0。在系统的极端位置上，控制装置就产生反应，使参数发生变化。如果系统的运动是从位置 a_1 出发的，那么由于这个位置不稳定，系统就达到了一个限位销钉，同时相继地达到限位销钉 a_1—a_5，沿着各段轨迹运动。

这时系统的参数 d_1 和 d_2 将以随机方式改变，使得在参数空间中（这里是平面 d_1，d_2 上）代表集合 d_1，d_2 的点，将如图 11.9 所示那样移动。如果在位置 3，代表系统参数集合 d_1^*，d_2^* 的那个点是在稳定区域里（区域 C 里），那么由于沿着图 11.8 上的轨迹（a_5—a_y）的位移，代表系统状态的点就移动到稳定位置 a_y。

由上述可见，无论系统的工作条件如何变化，不管加在系

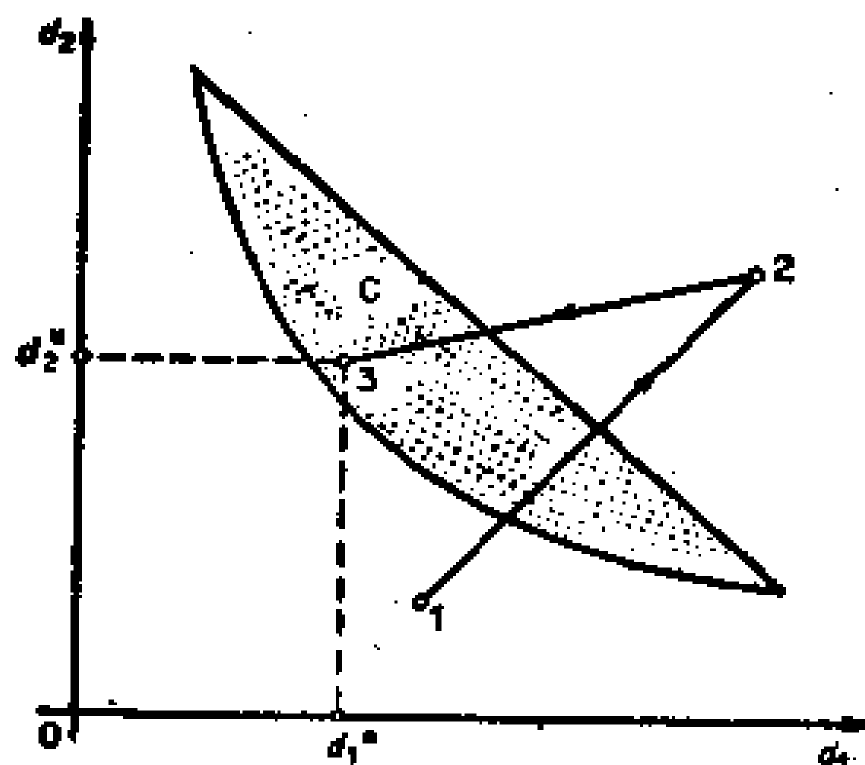


图 11.9. 在状态空间中体内平衡器的稳定区域

统上的外部作用是什么，只要确实存在一组参数能使体制稳定，那么象阿什比体内平衡器这样的系统，迟早会找到一组参数，结果就重新建立起它的稳定性.

总之，在这一章中所讲述的所有适应方法，都是以探索这一观念为基础的：探索优越的工作条件、探索优越的状态、探索优越的参数组.为了实现一个有目的的探索，系统就必须得到关于它的行为的有效性的信息. 在探索最有利工作条件的系统中，这就是工作的稳态条件的有效性；在适应自动机中，这就是得到"指令"的频率；在体内平衡器中，这就是系统的稳定性. 这样一来，每一个适应系统都在作一系列试验，并从这些试验中提取为改善它的行为所必需的数据. 就是说，这种系统的行动方式与有意识的生物是一样的，我们知道，有意识的生物正是一面研究自己和周围世界，一面在研究中学习如何确定自己的行为.

练习

1. 在一座平炉中，火焰温度取决于空气燃料比 k，这可以

表示为图 11.10 中所示的曲线，如果在整个加热过程中最优比 k_{opt} 是常数，那么就可以选择控制器的参数来保持空气燃料比 k，使得 k 的值为最优．但是还有一些附加的因素，由于这些因素，最优值 0 将在平面 t—k 上不断移动，如图 11.10 中的虚线所示．所以就把控制器作成适应的，使得它探索一个移动着的最优值．这样的控制器叫做极值控制器．在最简单的场合，控制器的工作如下：沿任何方向使 k 改变一个值 Δk，并测量温度 t．如果温度上升，那么就把比值 k 沿同一方向再改变一步长（Δk），如果温度下降，就沿反方向改变一个步长，直到系统达到它的最大点为止．只要 k 与 k_{opt} 之差不超过一步长，将假定这个控制系统已经找到了它的最大值并保持在这一值上．点 O 沿 k 轴（图 11.10）移动的最大速度是 3 米^3/公斤·分．如果步长 $\Delta k = 0.25$ 米^3/公斤的话，控制器应以多大的频率跨步以维持最优值？（假设开始时系统已找到了最大值．）

解： 每分钟 12 步．

2. 对于第 11.2 节中描述的那台自动机，计算当 $p_0 = 0.5$，$p_1 = 0.5$ 时的最终"处罚"概率 $p_{\text{罚}}^*$ 结果说明什么？

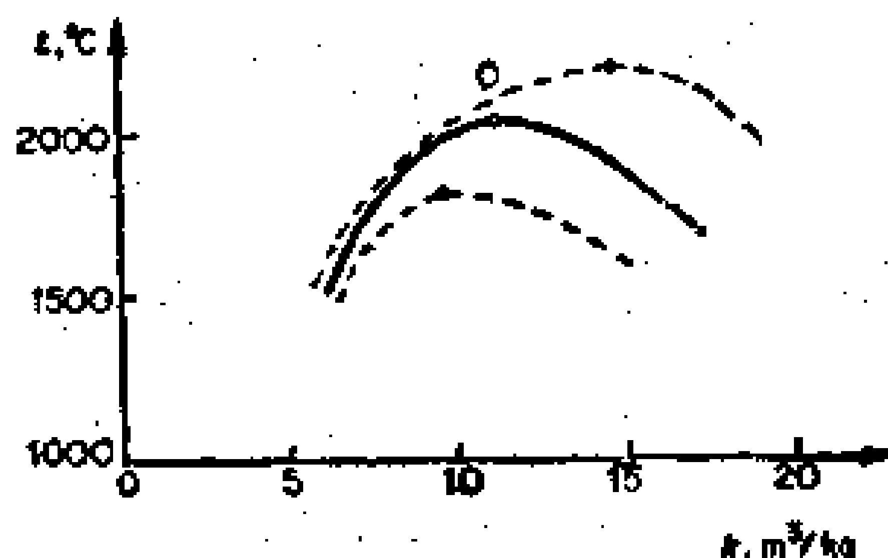


图 11.10．火焰温度对空气燃料比的依赖关系

解： $p_{\text{罚}}^* = 0.5$，这时处罚概率和那种行为不依赖于介质反应的自动机一样（$p_{\text{罚}}^* = p_{\text{罚}}$）．

3. 下面列举的哪些系统是体内平衡的？(a) 机床的电气拖动装置；(b) 人眼；(c) 时钟机构；(d) 计数器；(e) 一株植物的根系；(f) 控制绵羊体表温度的系统．

解： 系统 (b)，(e)，(f) 是体内平衡的．

第十二章　对　　策

到现在为止，我们考察了一些系统的行为，这些系统的控制器是这样工作的，它使系统在随机地变化着的扰动中，能显示出最有利的行为。但是还有这样的情况，那些对有控制器 Q_1 的系统 S_1 的工作有很大影响的因素，取决于系统 S_2 的控制装置 Q_2 的动作(图 12.1)。可以证明，系统 S_1 和 S_2 的“利益”在下列意义上是彼此相反的：系统 S_1 的功能的任何改善都意味着系统 S_2 的功能的恶化，反之亦然。于是，力求改善“本”系统功能的这两个控制装置，将产生尽可能损害“外”系统的控制反应。这种情况叫做**竞争**。竞争存在于，例如，活机体的生存斗争中，经济竞争中，战争中，以及许多别的场合，只要那里在解决控制问题时，必须考虑到对方控制系统功能的改善所带来的有意的反作用，都属此例。有才智的对手的存在，完全改变了构造有目的控制的问题性质，因为无论怎样选择控制，对手总是会考虑到这一点，仍力图把我们置于尽可能恶劣的条件下。

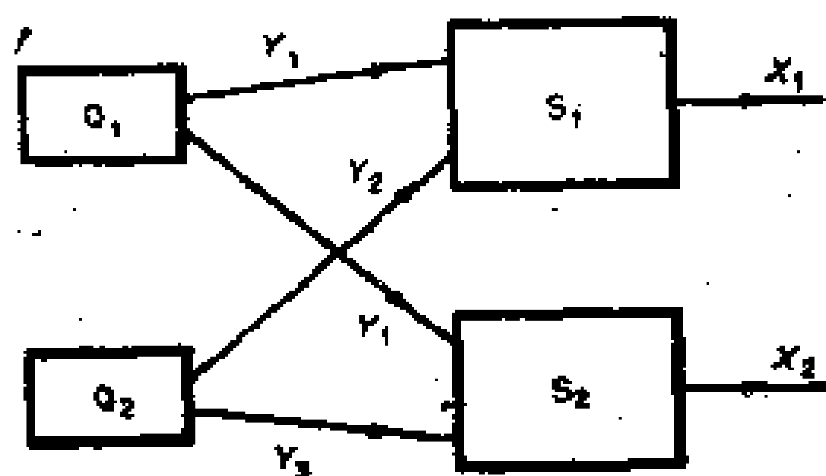


图 12.1. 两个控制系统对被控对象的交互作用

在竞争的情况下，控制问题由下列两部分组成，一是对于争斗中发生的情况作出反应，二是采取这样一个**策略**，即使对手施加最不利的影响，被控系统用了这种策略也能处于尽可能好的地位，

对策论就是发展解决这类问题的方法的。

12.1. 二人对策. 最小化最大策略

竞争的一个简化的、形式化的模型叫做对策(博弈). 一个对策规定一些规则，这些规则确定参加对策各方的容许行动，并确定决定他们的得失的方法. 如果有两方参加对策，这种对策就叫做二人对策. 零和对策是这样一种对策，其中所有各方的得失的代数和等于零.

我们来看一类简单的零和二人对策. 在这些对策中，双方的利益是直接抵触的，因为一方的得等于另一方的失. 所以我们可以自始至终只限于考虑一方的对策，在对策中这一方力求使自己的赢利达到最大，而他的对手则力求使这个赢利达到最小. 对策就在于每方都在可能的行动中采取一着. 我们假定一方的(行动的)选择是对手不知道的. 但是双方都知道双方行动的一切可能变式，也知道任何一个可能回合的赢利大小. 这种对策(叫做有限对策)可以方便地表现为一个矩阵 M，矩阵的各个元素 a_{ij}，指示出当 A 方选择行动 A_i 而他的对手 B 选择行动 B_j 时 A 方的赢利数量. 如果 A 方能作出 m 种不同行动而 B 方能作出 n 种不同行动，那么对策矩阵就含有 m 行和 n 列(表 12.1). 这个对策的矩阵也是个支付矩阵(它的元素表示 B 方应支付给 A 方的报酬). 所谓矩阵，我们

表 12.1 $m\times n$ 对策

	B_1	B_2	$\cdots$	B_n
A_1	a_{11}	a_{12}	$\cdots$	a_{1n}
A_2	a_{21}	a_{22}	$\cdots$	a_{2n}
$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$	$\cdots$
A_m	a_{m1}	a_{m2}	$\cdots$	a_{mn}

简单地理解为数的一个矩形排列，因此

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{bmatrix}$$

就是一个 3 × 3 的矩阵。

$m \times n$ 对策的解，是指双方找到这样一个策略，即一种操作方法，使得他在整个一大批对策中的平均对策取最大值.对策论建议各方选择这样的行动，使得在他的对手采取最不利行动的场合下，可以使自己得到最大的可能赢利。这种策略叫做最小化最大策略.

A 方最有利的（最优的）策略 A_k，可以这样从对策矩阵确定：找出满足条件

$$a_{kp} = \max_i \min_j a_{ij}$$

的元素，即，它是从所有各行中的最小元素中间选出的最大的元素.

B 方的最有利的策略 B_l 取决于元素

$$a_{ql} = \min_j \max_i a_{ij},$$

即这样一个元素，它是各列中最大的元素中间选出的最小的元素.

我们来看竞争的以下例子.一家工厂（A 方）要购进一批黑色染料来染布，染料的消耗量取决于下一季度的市场条件（B 方）.如果市场需求低，染料的需要量就为 10 吨，如果市场需求正常，染料需要量就为 15 吨，如果对黑布的需求大，就需要 20 吨染料.在作出决策时黑色染料的价格是每吨 100 元，它相应于低的市场需求.如果需求增加到正常，染料的价格就将上升到每吨 150 元，如果需求量很高，就将上升到每吨 250 元.

A 方应当怎样从三种现有策略中选择一个呢？是买 10

吨、15 吨还是 20 吨染料呢？ B 方可以确保三种水平的需求中的一种：低需求、正常需求、或高需求．这时对策矩阵的因次是 3 × 3．矩阵的元素是购买染料的价格，用双方的九种可能的策略组合的数据，这些价格容易计算出来．例如元素 a_{12} 对应于购买 10 吨染料(策略 A_1)和下一季度市场正常需求(策略 B_2)，a_{12} 的计算如下：以每吨 100 元的价钱买进 10 吨染料的总价是 1000 元．此外，如果对黑布的需求正常，就必须在这个季度中再以每吨 150 元的价钱买进 5 吨，这样就要化去 1750 元，即 $a_{12} = -1750$ 元，完整的买价矩阵如表 12.2 所示。

表 12.2

染料(吨)	需求		
	B_1 低	B_2 正常	B_3 高
$A_1 = 10$	$a_{11} = -1000$	$a_{12} = -1750$	$a_{13} = -3000$
$A_2 = 15$	$a_{21} = -1500$	$a_{22} = -1500$	$a_{23} = -2500$
$A_3 = 20$	$a_{31} = -2000$	$a_{32} = -2000$	$a_{33} = -2000$

从这张表可以看出，各行的最小值分别是 −3000 元，−2500 元和 −2000 元，各列的最大值分别是 −1000 元，−1500 元和 −2000 元，而各行最小的最大值（沿各列取）恰好与沿各行取的各列的最大的最小值相等（二者都等于 a_{22})．所以合理的解是以每吨 100 元的价格买进 20 吨染料．

在这个例子中 $a_{kp} = a_{ql} = a_{kl} = a_{33}$，这表明在对策矩阵中存在一个叫做鞍点的点，它同时是 A 方的最大值和 B 方的最小值，这种一致并不总是能出现的．在一般情况下对策矩阵可能不含鞍点．

鞍点 a_{kl} 具有下列重要性质：如果一方（例如 A 方）选择了对应于鞍点的策略 A_k，那么另一方(B)无论怎样偏开策略

B_l 都是不利的，因为他只能保持或增加 A 的利益，而不能减少它．在这个例子中 A 方可以运用策略 A_3，不管 B 采用什么策略，A 的赢利将不小于在鞍点处的赢利，对应于鞍点 a_{kl} 的最优策略 A_k 和 B_l 叫做**纯策略**．应当指出，如果存在一个鞍点，那就不必保守秘密．双方都可以公开他们所选择的策略．

12.2. 混合策略．对策值．优超

如果对策矩阵中不包含鞍点，那么各方都不存在最优的纯策略．这种对策有比较复杂的解．

我们考虑一个 2 × 2 对策的例子，它是不具有鞍点的．设 A 是一支部队的指挥员．这支部队要攻打敌人（B）的两个防守阵地之一，敌人只能成功地防守其中的一个阵地，而不能同时防守两个．又知道第一个阵地的重要性是第二个阵地的三倍．双方指挥员应当怎样行动呢？

我们以下标 1 记攻击和防守第一个阵地的策略，下标 2 记攻击和防守第二个阵地的策略．那么支付矩阵将形如

	B_1	B_2
A_1	0	3
A_2	1	0

（如果 B 正好防守着受到 A 攻击的那个工事，那么 A 的赢利就等于零．）容易看出这个矩阵是没有鞍点的：

$$\max_i \min_j a_{ij} = 0, \quad \min_j \max_i a_{ij} = 1.$$

在这个例子中用纯策略对双方都是不利的．实际上，如果 A 总是固执地采取一种行动（例如攻打较重要的阵地），那么知道了这一点，B 就会把 A 的所得降低到 0．同样，如果 B 总是防守他的最重要的阵地（这是从“常识”出发常常会采取的行动），那么 A 就可以稳拿 1 分——攻夺第二个阵地．所以应用纯策略的一方所处的地位，要比他的更“灵活”的对手更

加不利. 显然,更有利的是秘密地进行选择,有时选这一个纯策略,有时选另一个纯策略,不去按照任何预先知道的关系,而是随意地,如用骰子或随机数表进行选择. 例如,如果 A 以相等的概率来攻打两个阵地,那么不管 B 可能怎么做,A 的平均所得将大于 0.5,即无论如何要大于 0. 这就发生了下列问题: 使用纯策略的最优概率是什么? 对 2×2 对策的情况,对策论得到了一个比较简单的答案: 纯策略的这个概率应当按下列公式计算:

$$
\begin{aligned}
p(A_1) &= \frac{a_{22}-a_{21}}{(a_{11}+a_{22})-(a_{12}+a_{21})},\\
p(B_1) &= \frac{a_{22}-a_{12}}{(a_{11}+a_{22})-(a_{12}+a_{21})},\\
p(A_2) &= \frac{a_{11}-a_{12}}{(a_{11}+a_{22})-(a_{12}+a_{21})},\\
p(B_2) &= \frac{a_{11}-a_{21}}{(a_{11}+a_{22})-(a_{12}+a_{21})}.
\end{aligned}
\tag{12.1}
$$

对于我们的问题来说,我们得到下列概率:

$$
p(A_1)=\frac{1}{4},\quad p(B_1)=\frac{3}{4},
$$

$$
p(A_2)=\frac{3}{4},\quad p(B_2)=\frac{1}{4}.
$$

这时 A 的平均所得(即 B 的所失)将等于 0.75. 以某种概率随机地用一些纯策略或其他策略所构成的策略叫做**混合策略**. 指出使用构成混合策略一部分的纯策略的概率,这样,就给出了混合策略. 在本例中,双方的最优混合策略可以写为

$$
S_A=\left|\begin{matrix}\frac{1}{4}\\ \frac{3}{4}\end{matrix}\right|,\quad S_B=\left|\begin{matrix}\frac{3}{4}\\ \frac{1}{4}\end{matrix}\right|
$$

的形式，这里各纯策略是从上到下编号的。

与有一个鞍点的对策相反，在采取混合策略的情况下，所选择的具体行动必须不让对方知道，虽然谁都知道，对方总是可以根据对策矩阵把我方的最优混合策略计算出来。

最优混合策略的一个重要性质是，对于对方的任何策略（纯策略或混合策略），我方能确保自己的平均所得，不小于对方使用他的最优混合策略时我方的所得。这个平均所得可以由一个“内行”从一个“内行”对手那里拿到。这个平均所得叫做**对策值**。在本例中对策值是 0.75（有利于A）。在有鞍点的对策中，对策值等于在鞍点处的支付。如果对策值等于零，这个对策就可以看作是“公平的”。如果对策值不等于零，那么假使办得到的话，有一方（对策值为负的一方）还是以不搞对策为妙，不过这也是一种纯策略，这种纯策略把对策变为一个具有鞍点的、其值为零的对策。

应当指出，如果把所有的支付值都乘上一个常数（比方使用另一种货币来表示支付值），或者把所有的支付值都加上一个常数，双方的最优策略是不变的。当然，**对策值**将相应地有所改变。

如果一个对策具有一组纯策略，个数超过 2×2，那么这个对策的解就复杂了。但是冯·诺伊曼已经证明，每个 $m\times n$ 对策至少有一个解，对双方来说都是最优策略（纯策略或混合策略）。

表 12.3

	B_1	B_2	B_3
A_1	2	−1	2
A_2	3	4	0
A_3	1	2	−2

我们将指出支付矩阵的下列性质：有时它允许把对策化为具有较少策略的对策。例如我们来看如表 12.3 所示的具有三人矩阵的对策。

我们比较一下对应于策略 A_2 和 A_3 的支付值，容易看出，

不论 B 选择什么策略，策略 A_2 给 A 的所得都比 A_3 给 A 的为大．这时我们说策略 A_2 优超策略 A_3．显然 A 使用策略 A_3 是失策的，所以不必考虑它．同样，比较 B_1 和 B_3，显然 B_1 对 B 不利，应当更精确地说 B_1 并不更好些，因为当 A 使用策略 A_1 时 B 的所失相同．所以只要考虑表 12.4 所示的矩阵就够了．

表 12.4

	B_1	B_3
A_1	-1	2
A_2	4	0

优超能把 3×3 对策化为 2×2 对策．使用公式(12.1)并考虑到优超，我们求出原来的对策的最优混合策略：

$$S_A=\begin{vmatrix}\frac{4}{7}\\ \frac{3}{7}\\ 0\end{vmatrix},\qquad S_B=\begin{vmatrix}0\\ \frac{2}{7}\\ \frac{5}{7}\end{vmatrix}.$$

对策值等于 $\frac{8}{7}$．如果任何纯策略都不比由其他纯策略组合成的混合策略更有利，就会出现更复杂的优超情况．

以上介绍了最简单类型的零和有限二人对策．具有大量策略的对策要复杂得多，特别是所谓无限对策（具有无限个纯策略）以及多人对策（特别是结盟对策），在结盟对策中局中人结起盟来以增加全体的所得．对策论的成就正在被广泛地应用于许多领域，象分析社会上人们和社会集团的行为、在对一个对象的信息了解得不完全的情况下选择最优的行动方式（所谓“对抗自然对策”），以及一些生物学问题．

12.3. 机器对策

为了用对策论方法在竞争情况下作出决策，必须进行一系列计算和逻辑运算．这些运算就是计算对策矩阵的各元素、

从某一数组中分出最大数和最小数、计算使用纯策略(它们构成混合策略的一部分)的概率. 显然,这类工作正是数字计算机能完成的,数字计算机是可以解决对策问题的.

为了实现混合策略,计算机还必须用到一个具有某种统计特性的随机信号源,特别是这样一些信号,它们给出策略的号码的一个随机序列,各号码的频率则是已知的.

可以用一个随机的物理过程,例如放射性分解或电子管阴极的热噪声,作为随机信号源. 也可以从贮存在计算机存储器里的随机值表得到随机信号,或借专门算法(产生伪随机数的算法)来产生随机信号.

由于数字计算机运算得非常快,它们能够在复杂情况下求出并实现最优策略(对于 $m \times n$ 的巨大值),比由人来做更为适宜. 计算机还有一个优点,它容易达到"不可预测性",即在运用混合策略时相继走哪些步子是绝对随机的,而在人通常提供的步子序列中,总是可以发现某种规律性的,尽管他力求以随机的方式组合各步. 为此之故,特别是人对计算机的许多比赛都已证明,至少在单着对策中,计算机要明显地占上风.

当要求计算机实行多着策略的对策时,情况就大不一样了,这时赢利是作为对手着法的比较长的序列的结果而决定的,例如在下象棋时就是这样. 这时计算机就不如人了,因为人会使用积累的知识,具有创造性,并能根据启发式方法在不同着法中经济地选择着法,而启发式方法能够发展从解决战略战术问题中获得的丰富经验.

在多着对策中能不能成功地选择策略,主要要看机器是不是能选出各种着法,这又取决于运算速度和存储器的容量. 下象棋时,随着要进行计算的着数的增多,必需的运算数目和存储器容量增加得很快.为了确定一个预见四着的对策结果,

计算机必须考察数量级为 10^{12} 种可能着法，这即使对于强有力的现代计算机来说，困难也是很大的。

在这种情况下，计算机要成功地运算的话，在相当程度上，也依赖于如何选择估计函数

$$y = F_0(x),$$

这里 y 是这样一个数，从更接近于达到目标这一观点来看，它表征中间形势的值，而 $x = \{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$ 是在估计这一形势时应考虑的因素。在下象棋时，这些因素是双方的棋子势力和布棋的格局。在作战时，表征形势的因素是兵力、装备和他们的机动能力。在作战的对策模型中，也可以考虑到经济潜力、士气和其他因素。

如象棋、跳棋和别的策略游戏编写程序的问题，在世界各国的科研单位都正进行着研究。研制和改善游戏机的兴趣是和使用博奕方法来解决各种重要问题联系在一起的，这些问题是：在工业、运输、农业中如何分配投资、如何利用自然资源、在作战时如何选择战略以及许多别的专题。

练习

1. 求出下列矩阵的 $\max\limits_i \min\limits_j a_{ij}$ 和 $\min\limits_j \max\limits_i a_{ij}$：

(a) $\begin{vmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 2 & 1 & 3 \\ 5 & 2 & 1 \end{vmatrix}$　　(b) $\begin{vmatrix} 1 & 8 & 4 & 6 \\ 2 & 6 & 17 & 81 \\ 9 & 15 & 0 & 5 \\ -2 & 1 & 7 & 3 \end{vmatrix}$

解：(a) $\max\limits_i = 5, 3, 4$，$\min\limits_j = 1, 1, 1$，$\min\limits_j \max\limits_i = 3$，$\max\limits_i \min\limits_j = 1$。(b) $\max\limits_i = 9, 15, 17, 81$，$\min\limits_j = 1, 2, 0, -2$，$\min\limits_j \max\limits_i = 9$，$\max\limits_i \min\limits_j = 2$。

2. 在下列对策矩阵中求出鞍点：

(a) $\begin{vmatrix} 2 & 4 \\ -1 & 8 \end{vmatrix}$ (b) $\begin{vmatrix} 2 & 6 & 1 & -1 \\ 3 & 5 & 8 & 4 \end{vmatrix}$ (c) $\begin{vmatrix} 5 & 11 & 5 & 5 \\ 6 & 3 & 4 & 4 \\ 1 & 2 & 3 & 8 \end{vmatrix}$

解：(a) $a_{11}=2$。(b) $a_{21}=3$，(c) $a_{13}=5$。

3. A 和 B 这两个对手同时且互相独立地写出 1，2，3 三个数之一。如果他们所写的数之和是偶数，则 B 付给 A 等于这一和数的钱；如果是奇数，则 A 付给 B 等于这一和数的钱。写出对策矩阵。

解：A 有三种策略：A_1——写 1，A_2——写2，A_3——写3。B 也有三种类似的策略。对策矩阵 3×3 如表 12.5 所示。

表 12.5

	B_1	B_2	B_3
A_1	2	−3	4
A_2	−3	4	−5
A_3	4	−5	6

4. 当计算机在为跳棋或国际象棋编程序时，必须分析在对手各着之后应当走哪一着，并对这一着进行估值。分析各着的任务在于，从棋盘上的给定形势出发，再走过几着，分析这几着中会出现的所有变式，并从中选择最优的变式。对于走了任何一着以后造成的形势来说，以某种方式进行估值，并选择最小着，所谓最小着，是这样的一着，它产生的形势所具有的估值，是所有可能最大值中的最小者。图 12.2 给出了白方第一着以后接下去各着的所谓"分析树"。我们已经用某种方法，对分析预见三着的结果而出现的各种形势作了估值。请用最小化最大策略来确定白方从初始位置出发的最优各着。

解：如果我们考察在分析预见三着时所出现的各种形势，那么白方的最好形势将是 +100。但是要达到这一形势，只有当黑方每走一着都对他自己最为不利时，才有可能。对黑方作同样的考虑，可以求出沿分析树从出发位置到最终位置的最优运动路径。在本例中，最优路径终止于具有估价 +20

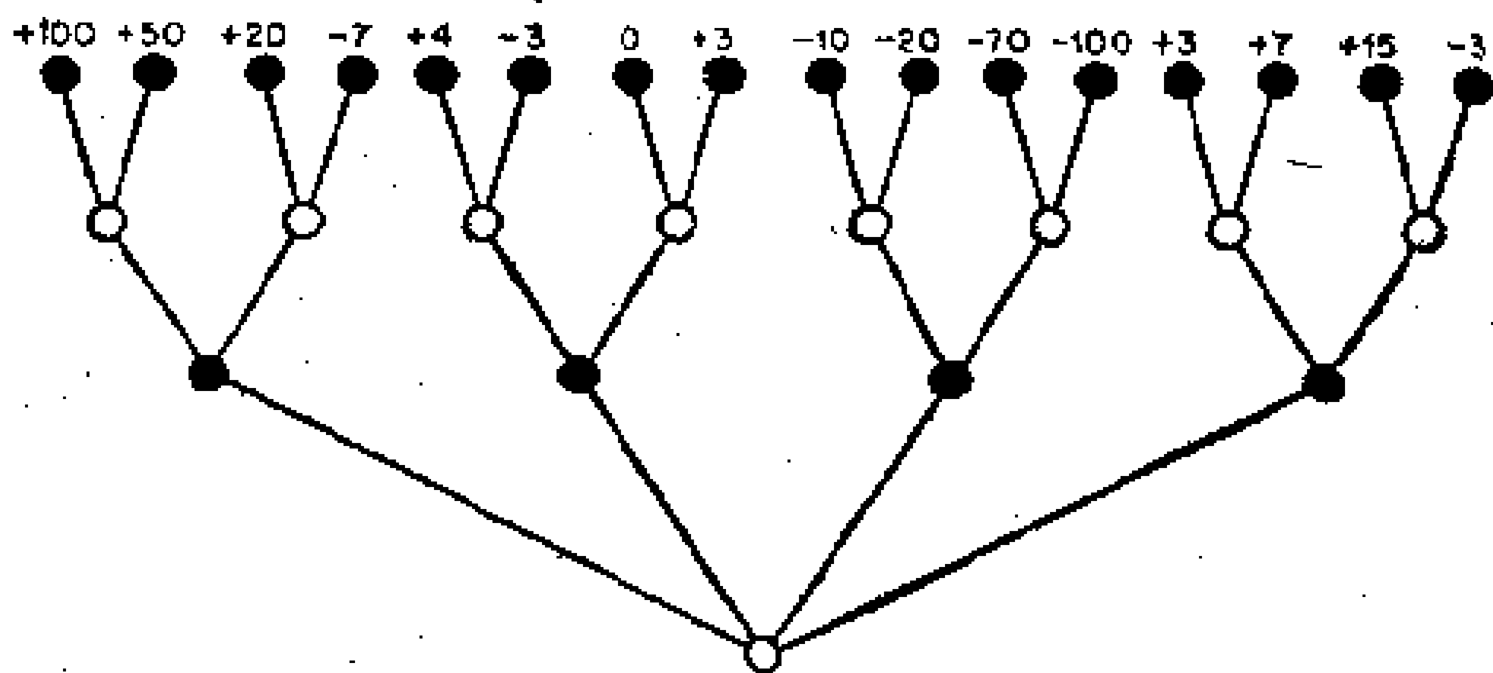


图 12.2 （第 4 题）

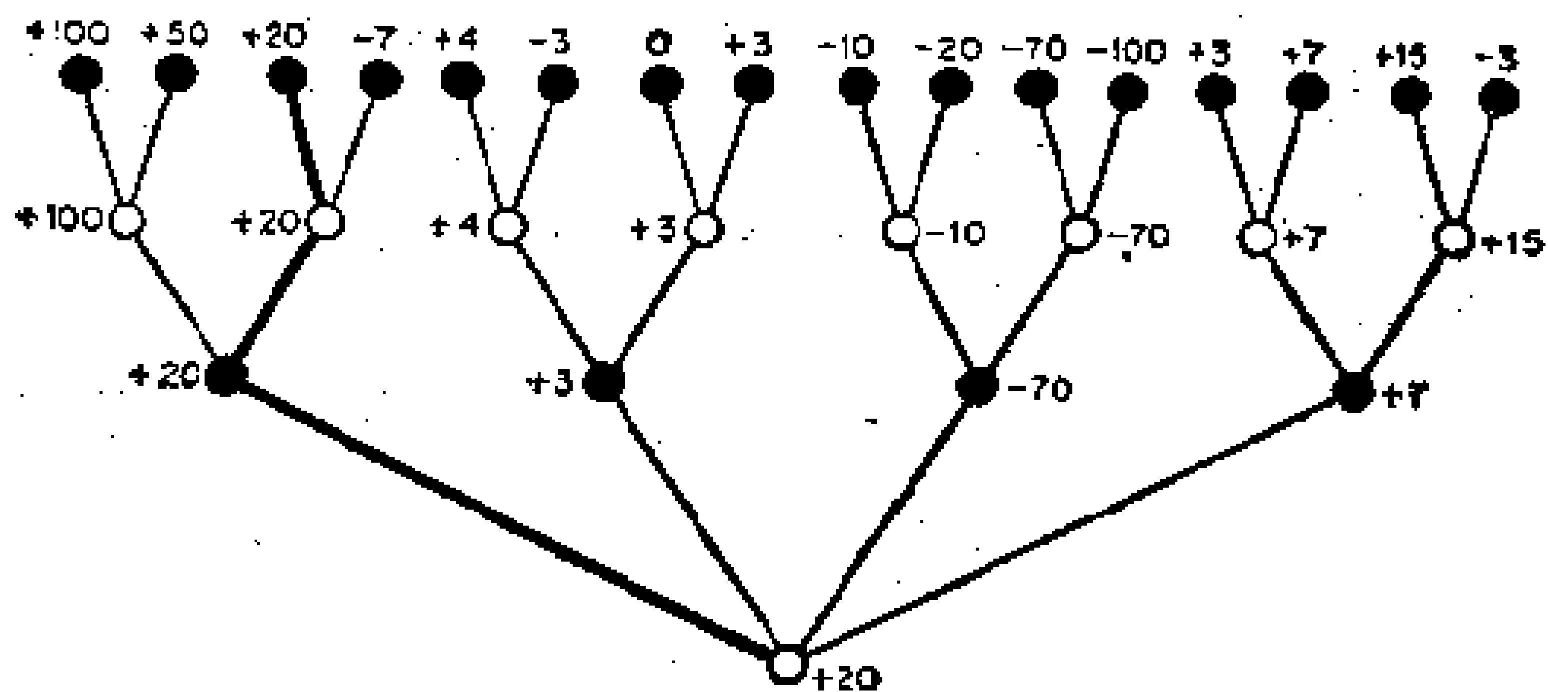


图 12.3 （第 4 题）

的那个形势。这条最优路径和各中间估值如图 12.3 所示。

5. 一个病人患着重病。这种病可能有三种类型。在本病例中还不能确定是哪种类型。也不知道有关的统计数据。医生可以用三种不同的治疗方法：X 射线疗法、动手术和配新药。X 射线疗法能治愈 30% 的患第 I，III 型病的病人和 10% 的患第 II 型病的病人。动手术对第 I 型病的成功率是 20%，对第 II，III 型病的成功率是 50%，药物疗法对 25% 患第 I，II 型病的病人和 50% 患第 III 型病的病人有效。不能同时用三种方法治疗。医生的最优策略是什么？如果用了最优策略，病人复元的机会是多少？

提示：$2\times m$ 型的对策有一个最优策略，这个最优策略是以不超过两个的纯策略为依据的，即 $2\times m$ 对策可以化为 2×2 对策。

解：这个"与自然对策"的矩阵可以写出如下：

	B_1	B_2	B_3
A_1	30	10	30
A_2	20	50	50
A_3	25	25	50

这里 A_1 是X射线疗法，A_2 是动手术，A_3 是药物疗法。B_1 是Ⅰ型病，B_2 是Ⅱ型病，B_3 是Ⅲ型病。

显然，B_1 优超 B_3，排除策略 B_3 后，我们得到一个 2×3 对策。在这个对策中可以证明策略 A_3 不及 A_1 和 A_2 的混合策略。所以我们来看这样一个 2×2 对策，它的矩阵是

	B_1	B_2
A_1	30	10
A_2	20	50

这个矩阵有解

$$S_A=\left|\frac{3}{5}\ \frac{2}{5}\right|,\qquad S_B=\left|\frac{4}{5}\ \frac{1}{5}\right|.$$

我们通过计算平均支付来检验这个解，这时使用原来的对策矩阵

	$\frac{4}{5}$	$\frac{1}{5}$	0	
$\frac{3}{5}$	30	10	30	26
$\frac{2}{5}$	20	50	50	26
0	25	25	50	25
	26	26	30	

（在矩阵的左边和顶上给出策略的概率，在右边和底下给出

为应付对手找到的混合策略而选择一个给定纯策略的平均支付）. 验证指出排除策略 B_3 和 A_3 是合理的. 这样一来医生应当以 $\frac{3}{5}$ 的概率用 X 射线疗法，以 $\frac{2}{5}$ 的概率动手术，而完全不应当用配药的办法. 这个对策的支付等于 26. 对于这种病的最不利的统计资料来说，用这个最优策略后病人复元的平均机会是 26%. 应当指出，方法 A_1 给出了一个较大的复元概率，虽然初看起来好象用它得到的结果是不太有利的.

第十三章　学　　习

学习的过程通常就是由教师向学生传授知识或解题方法，或二者兼而有之．可以用两种根本不同的方法来教人们解题．第一种方法是向学生传授解题的算法．第二种方法是通过举例来学习．

因此可以用下列方式来教人们或机器进行算术运算或逻辑运算，或者是说明适当的算法，或者是编制实现这一算法的程序．但是如果问题是阅读，包括识别，用不同字体印刷的或手写的字母或数字，那么要教会人们或机器解决这种问题，靠说明这些符号的结构或描述识别的机制是不行的．甚至连用举例方式教学的教师自己，也可能不知道这种机制是什么．

用例子来学习，对于动物界的许多物种的生存是非常重要的．动物要教它们的后代获得食物和躲避危险，并不是向后代传授解决这些问题的方法，它们总是使用举例的教法．使人们能解决各种日常问题的大部分习惯和方法，也是用观察和类比获得的，而不一定依靠获得一种说明．

直到最近，用自动化机器，包括象数字计算机这样的发展成熟的自动化机器，来解决各种问题，都是按照程序进行的，这种程序明确地包含解决各个问题的算法．可以设想，人们在确定自动机的结构以后，或者给数字计算机制订了程序以后，就用第一种教法来教它解决一定类型的问题．已经证明，这个方法并不适用于我们还不知道其算法的问题，虽然我们可以直观地解出这些问题．例如，一个人容易学会把猫或狗区别开来，或者认出他的朋友，或者接住一只飞来的球，但是

他却写不出能使机器做同样事情的程序.

由于目前已做出一些解决各种问题的例子，扩展机器潜力的愿望正驱使科学家和工程师们努力在机器中复制学习能力. 这项工作已经产生了积极的结果.

13.1. 图形识别

用举例方式教机器的第一个成功的尝试，是研制这样一台自动机，它能学会识别视觉图象，如几何图形、字母、数字和别的符号. 图形识别问题如下. 存在一个集合 X，它包含 n 个不同对象，n 是个很大的数，

$$X = \{x_1, x_2, \cdots, x_n\},$$

它属于 m 个已知类 $X_1, X_2, \cdots, X_m$; m 是个较小的数. 如果自动机 A 总是，或几乎总是，把各个对象 x 与已知类 X_i 联系起来，我们就认为自动机 A 解决了识别问题.

例如，如果 X 表示数字的一切可能形状的集合，那么问题就在于把各个形状分别与 0, 1, 2, ···, 9 这十个类联系起来，这十个类都代表相应数字的图形. 集合 X 可以含有不同的几何形状，在这些几何形状中，必须区分出属于三角形、矩形、圆形等类的图形.

准备用来识别视觉图形的自动机，显然应当含有输入装置，以接收关于要识别的对象的信息. 这种自动机的输入装置叫做接收器场. 接收器场可以是由一些光电管镶嵌而成的，要识别的图象就投射在它上面. 如果接收器场由 r 个元件组成，而每个元件都可以处于两种状态之一(受激或未受激)，那么在输入处的可能形状总数将是 $n = 2^r$. 即使对于小的数目 r 来说 (数量级为 10)，可能形状的总数 n 也如此之大(数量级为百万)，以致实际上不可能把各个形状的信息全部放入计算机的存储器中.

图形识别自动机的输出装置应当含有 m 个输出．知道了哪些输入是受激励的，就有可能判断自动机应把提交给它的对象分入哪一类．

为了使自动机能够学习，它必须处理 N 个可能的内部状态 $z=\{z_1, z_2, \cdots, z_N\}$（$N$ 是个相当大的数），z 应当含有这样的状态，在这些状态中，自动机能按所需方式把对象加以分类．

教这种自动机识别图形，就是向这种自动机提供 $l \leqslant n$ 个例子来说明如何把对象 x 分入类 X_i（l 是个较小的数），同时把自动机 A 引入这样一个状态 z，在这一状态中将实现对象的所需分类，这些对象中，也包括在学习过程中未提供给自动机的那些对象．人们发现，如果已经选出自动机的这样一种状态，在这种状态中自动机将正确地把相当多的 S 个从集合 X 中随机选出的对象进行分类，那么它也将以一定的概率足够好地对已知集合 X 的所有别的对象进行分类．因此教自动机 A 识别图形的大概轮廓的过程如下．

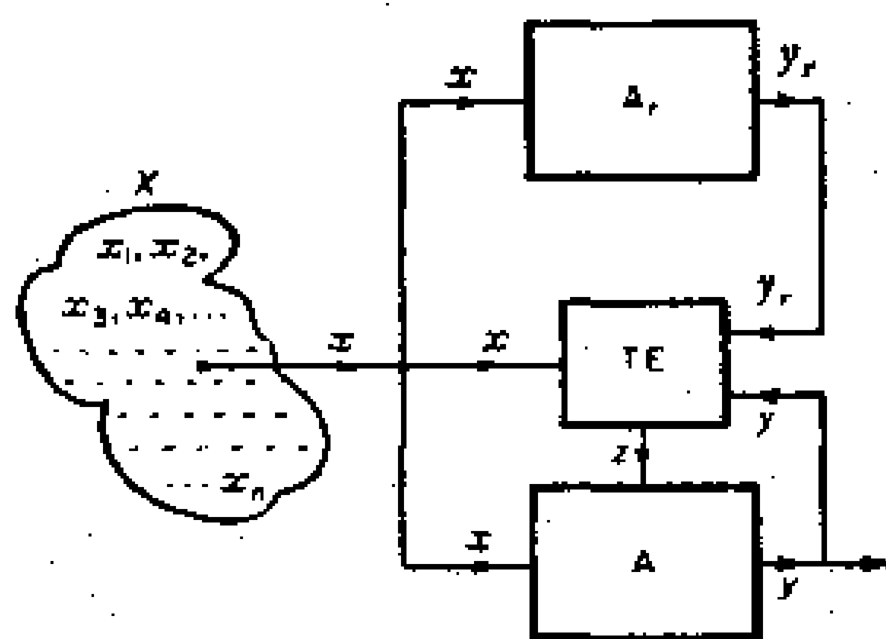


图 13.1．表示教自动机识别图形的教学过程的略图

通过对自动机的接收器场的作用，把从集合 X 中随机选出来用于学习的 l 个对象提交给自动机 A（图 13.1）．教师——一台基准自动机 A_r（人也可以起基准自动机的作用）——告诉自动机 A 各个对象属于学习序列 $x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{il}$ 的哪一类．

在教学过程中，教学装置 TE 把基准自动机 A_r 的反应 y_r 与学习自动机 A 的反应 y 进行比较，并改变自动机 A 的状态

z，使得A的反应尽可能经常地与A_t的反应一致．然后把对象的一个随机选出的试验序列$x_{k1}, x_{k2}, \cdots, x_{ks}$提交给自动机．如果自动机在这第二个试验序列上所犯错误的次数不超过容许数目，那么我们就认为学习过程结束了；否则就再教自动机A，并进一步用试验序列来进行检查．这个手续继续到实现了所要求的识别可靠性为止，或直到发现教不会这台自动机以所要求的可靠性来识别给定对象为止．

这个学习过程的有效性，很大程度上依赖于下列三个因素：(a)把对象映射为自动机的接收器场上的一个形状的方法，即实际对象呈现在自动机A的输入处的轮廓是什么以及这种轮廓如何编码；(b)把输入的形状变换为自动机输出反应的所有变换的数量，即自动机状态可能有多少种；(c)学习装置的操作的算法．

映射(表象)应当这样选定，使得分类装置的输入包含适于分类的信息．变换的数量应当大到足以使自动机学会解决相当广的一类问题，但又不应当太大，以便在找寻必要的变换时不致产生过分的困难．至于教学装置的操作算法，它应当用尽可能短的学习序列就能保证尽可能大的识别可靠性．

教学机是怎样识别图形的呢？这个问题可以用几何来解释．由r个接收器组成的接收器场上的每个形状，都可以表示为r维接收器空间中的一个点，沿着这个空间的各坐标轴记下各接收器的受激程度$\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_r$．

如果把X的对象分成给定的类别，那么可以在接收器空间里画出一个曲面，它把这个空间分成若干区域，每个区域只包含代表单独一类对象的那些点．如果把集合X分成X_1和X_2两类，那么就可以把识别问题看作求曲面方程

$$F(\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_r) = 0$$

的问题，这个曲面把接收器空间分成这样两部分，使得所有属

于类 X_1 的对象在区域

$$F(\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_r) > 0$$

里，而所有属于类 X_2 的对象在区域

$$F(\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_r) < 0$$

里，如图 13.2 所示。自动机 A 的各个状态 z，都可以看作分隔面的各种可能类型之一，而学习就在于选择一个曲面，使得这个曲面确保把对象分成 X_1 和 X_2 两类，这样的分法和教师或基准自动机 A_r 的分类是相当接近的。

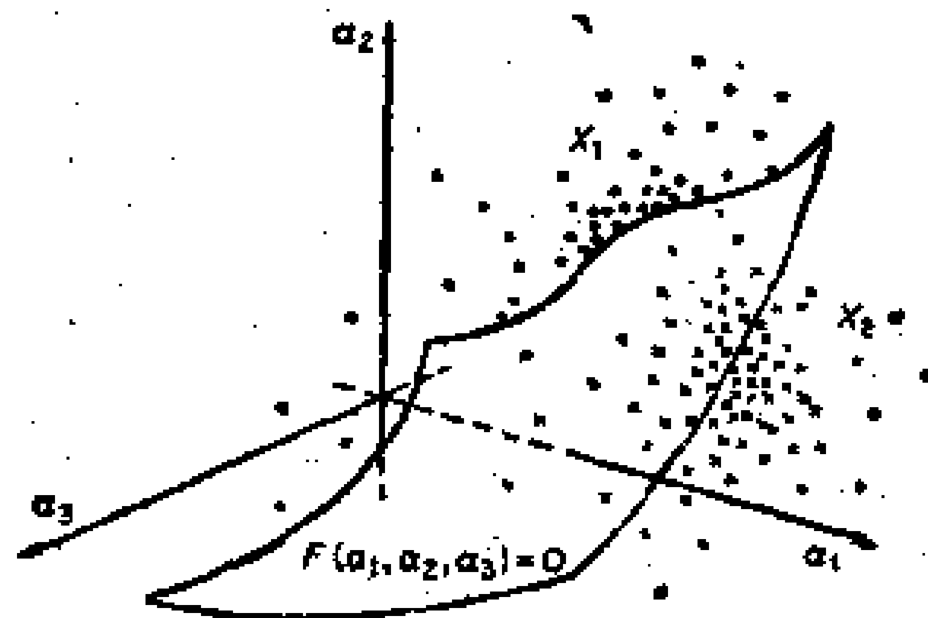


图 13.2. 在接收器空间中分隔图形的曲面

现在已经制出了一大批供图形识别教学机用的算法。所有这些算法的原理，都是把学生的输出与基准自动机的输出进行比较，并把教学自动机变换到新状态（通过改变自动机的参数），使得在这种状态下，自动机 A 和 A_r 的输出分歧数减少。

下列程序是把对象分为 X_1 和 X_2 两类的简单算法的一个例子。这两类的样本是以二进制码的形式编码的。这时我们以表格形式一个接着一个地把所得的码组合写成一行。设类 X_1 和 X_2 都有一定数量的样本，它们是为学习过程和组成学习序列而选定的。对于学习序列表的每一列，计算出现 1 与 0 的经验（实验）频率。例如，如果在表的第一列有 1 个 1 和

9 个 0，那么 1 的出现频率是 $p_1=\frac{1}{10}$，而 0 的出现频率是 $p_0=\frac{9}{10}$. 然后取这些值的对数，并作出一张横式表，它的格式等于码组合的长度. 对于含有学习序列类 X_1 和 X_2 的表的每一列，把计算出的差 $R_0=\log p_{01}-\log p_{02}$ 记到横式表的顶行，把差 $R_1=\log p_{11}-\log p_{12}$ 记到底行. 构作这样一张表的过程，正是模仿机器中的学习过程的.

然后接下去进行试验. 我们把造好的这张表加到具有码组合的那张表上去，使得这两张表的横格号数对齐，并进行下列运算：从表的 R_0 行，先写出对着含有零的码的那些数，再从序列 R_1 中写出对着数字 1 的那些数. 把这些数都加起来. 如果它们的和大于 0，就认为该对象属于类 X_1；如果它们的和小于 0，就认为该对象属于类 X_2.

设计一个学习识别图形的系统，已有的理论和技术仍然很幼稚. 但是，即使现在，也能为数字计算机建造这样的装置和程序，它们能成功地解决下述关于学习机的困难问题，象识别手写体的字母和数字，解释地质数据，识别某些语音，诊断某些疾病. 已经证明，机器学习解决识别问题，在一些情况中，比人要好得多.

13.2. 学习行为

把概率自动机看作是一个能学习的系统的模型是方便的. 在自动机输入处加一个激励，就可以用输入处观察到的某种反应的概率，来表示自动机行为的特性. 我们将限于考察简单的情况，这时知道有限个可能的激励 $x_1, x_2, \cdots, x_n$，而表示自动机行为的一切可能反应 $y_1, y_2, \cdots, y_m$ 可以用概率矩阵 M 来描写(表 13.1).

表 13.1

	y_1	y_2	…	y_m
x_1	p_{11}	p_{12}	…	p_{1m}
x_2	p_{21}	p_{22}	…	p_{2m}
…	…	…	…	…
x_n	p_{n1}	p_{n2}	…	p_{nm}

这个矩阵的元素 p_{ij} 表示下列事件的概率，这个事件是：自动机A将在状态 x 下用反应 y_j 来应答激励 X_i。如果集合 $y_1, y_2, \cdots, y_m$ 包含了所有的可能反应，而自动机总是以某一输出反应来应答输入激励的，那么对每一个激励的所有反应的概率和等于1：

$$\sum_{j=1}^{j=m} p_{ij} = 1 (i = 1, 2, \cdots, n)$$

对于自动机的 n 种可能状态 $x_1, x_2, \cdots, x_n$，都有某个确定其行为的矩阵 $M(x)$ 与之对应。

自动机A的行为的每个个别动作，都取决于数对 (x_i, y_j)，即对第 i 个激励的第 j 个反应，对于每一个这样的数对，可以给出一个值 α_{ij} 与之相对应，这个值表征自动机行为的有效性。所以我们可以把自动机的学习过程，看作是自动机的状态转移过程，在每次转移的状态下，得到高值的概率上升。

当研究人和动物的某些行为方式中的学习过程时，以及为了建造人工的学习控制装置，上述学习自动机的模型是有用的。

已经证明，概率自动机是可以学会有目的地行动的，如果由教师或介质对概率自动机施行"赏"或"罚"，并且如果对某一转移，自动机每次都受到"处罚"，那么转移到这一状态的概率就会下降，而在所有别的场合这一概率就上升，特别是用这

种办法，就有可能教会概率自动机很快地求出一个双变量函数的最小值。这个问题归结为探索这样一个系统的最优工作条件，该系统的有效性依赖于两个控制变量。自动机按照函数 $y=R(x_1, x_2)$ 的变化，在 X_1，X_2 平面上选择代表点的位移速度的方向和大小(图 13.3)。

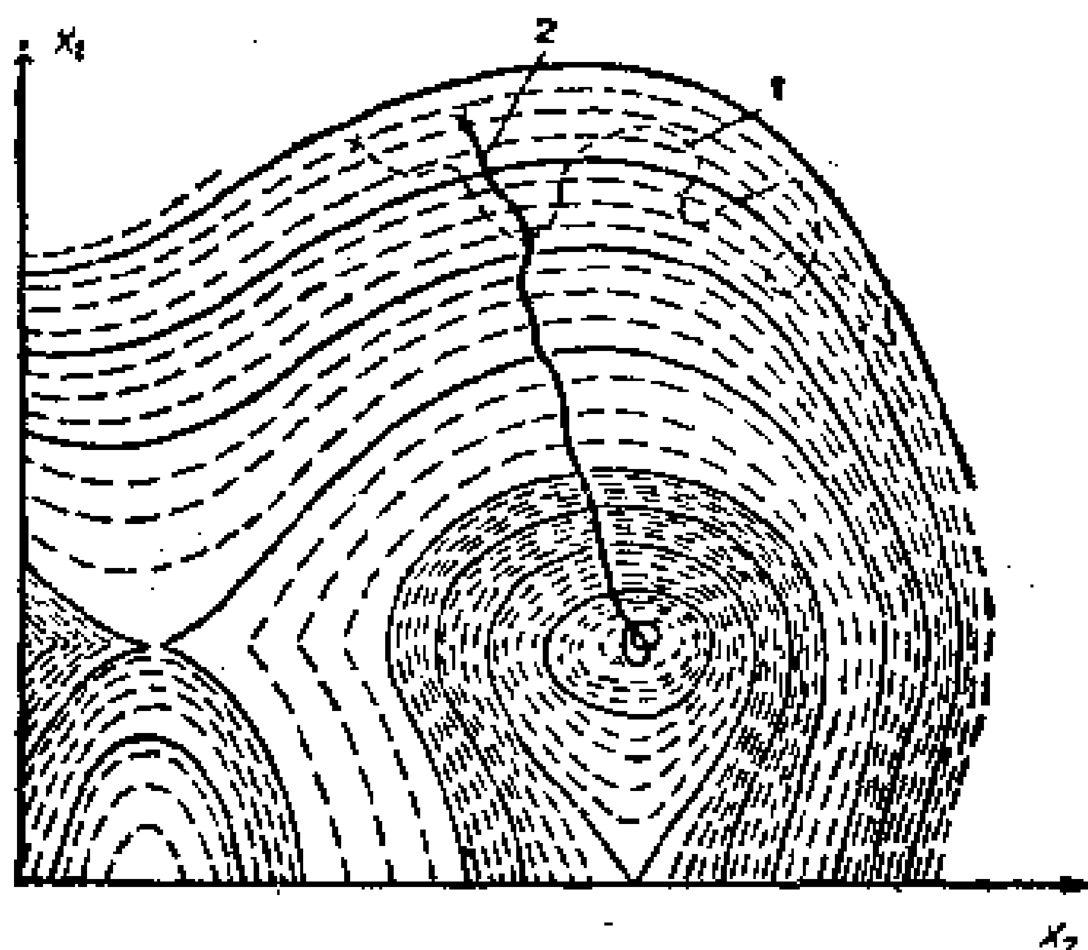


图13.3. 用自动机探索双变量函数 $y=R(x_1, x_2)$ 的最小值

y 的等位线如图 13.3 所示。代表点走向最小值 y 越快，自动机受到的"处罚"就越小。实验证明，这样一个学习系统是有效的，这可以通过把学习前代表点的运动轨迹 1 和学习后的轨迹 2 进行比较来判断。从图 13.3 可以看出自动机已学会有目的地探索所需求的变量 x_1 和 x_2 的值。

可以用类似的方法来教会自动机解决许多复杂问题，并且教会自动机在各种复杂情况下发展有目的的行为。

只要在用例子学习阶段和试验之间，插进一个训练时期，自动机的学习行为的效率就可以大大增加。训练的内容可以是，例如，对同一个学习序列多次地验算自动机的性能指标

值，而把介质的反应或教师的赏与罚，用作使自动机发展需要行为的补充教育.

如果学生只会通过赏或罚的方式来掌握复杂行为的方法，那么不论是教自动机，甚至是教发展行为的复杂形式的人，都是不可能的.

总之，如果要自动机能够学习复杂的行为，那么这台自动机本身就必须非常复杂，它必须有非常多的可能状态. 但是，这时要在大量状态中找到为数很少的几个状态之一，使得这台复杂的自动机在此状态中具有所需性质，将是一项极其困难的任务，因为从自动机的状态中分出这几个状态的过程繁极了.

如果在学习过程中使用中间子目标，这使我们能把学习分成几个阶段，那么任务就容易多了. 在第一阶段上，让自动机学习解比较简单的问题，然后根据在自动机中已经形成的适于解决简单问题的结构，再在每个新阶段上，教自动机解越来越复杂的问题，直到达到最后目标为止. 针对自动机的这一学习策略，使人想起教人学习的正常次序，受教者在每一个学习阶段都被给予更复杂些的问题，使用以前各学习阶段中获得的知识，这些问题就能获得解决.

13.3. 教学机

教学的内容，在于组织这样一个过程，作为这个过程的结果，人们掌握了某些事实和习性，从而使他们能用自己的知识解决各种问题. 要解决的问题可能是简单的，象打字、卡片穿孔，也可能比较复杂，象翻译文章、查找无线电接收机的故障或解数学问题. 不论人们准备学习的这些活动的性质如何，目的总是积累某种知识和某种技能.

直到最近为止，人还只是由人来教的，教者偶尔使用电

影、录音机和直观教具．从控制论的现代成就来看，教学可以当作一个控制过程，它服从表征控制过程的规律；在一定程度上这个过程可以通过适当的技术装置实现最优化和自动化．

在一定的教学阶段，教师不直接参加，而用某种技术装置与学生合作来进行教学，这种技术装置叫做**教学机**（见图13.5）．

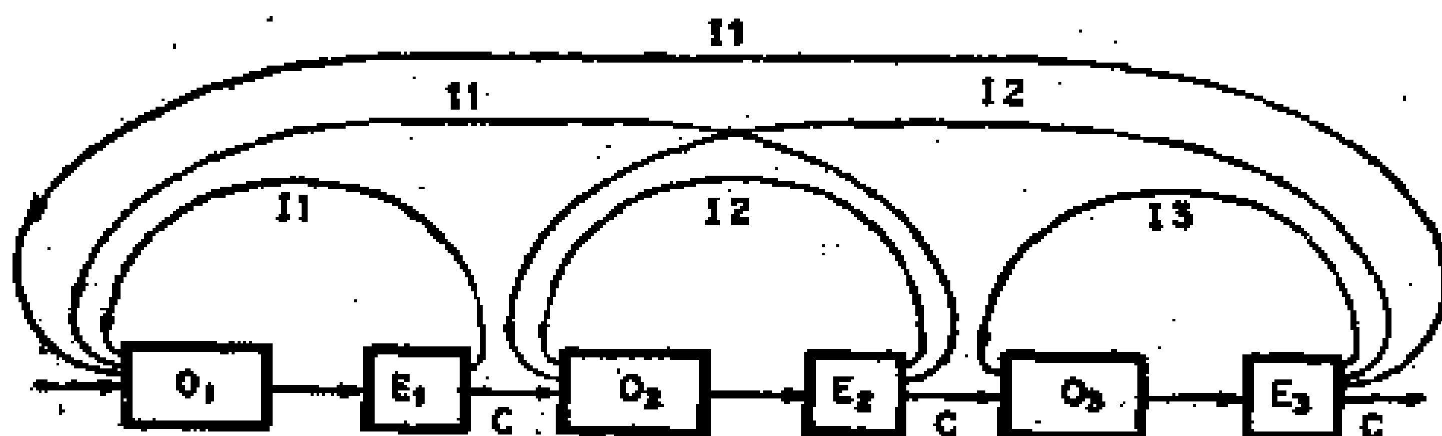


图13.4． 教学过程图

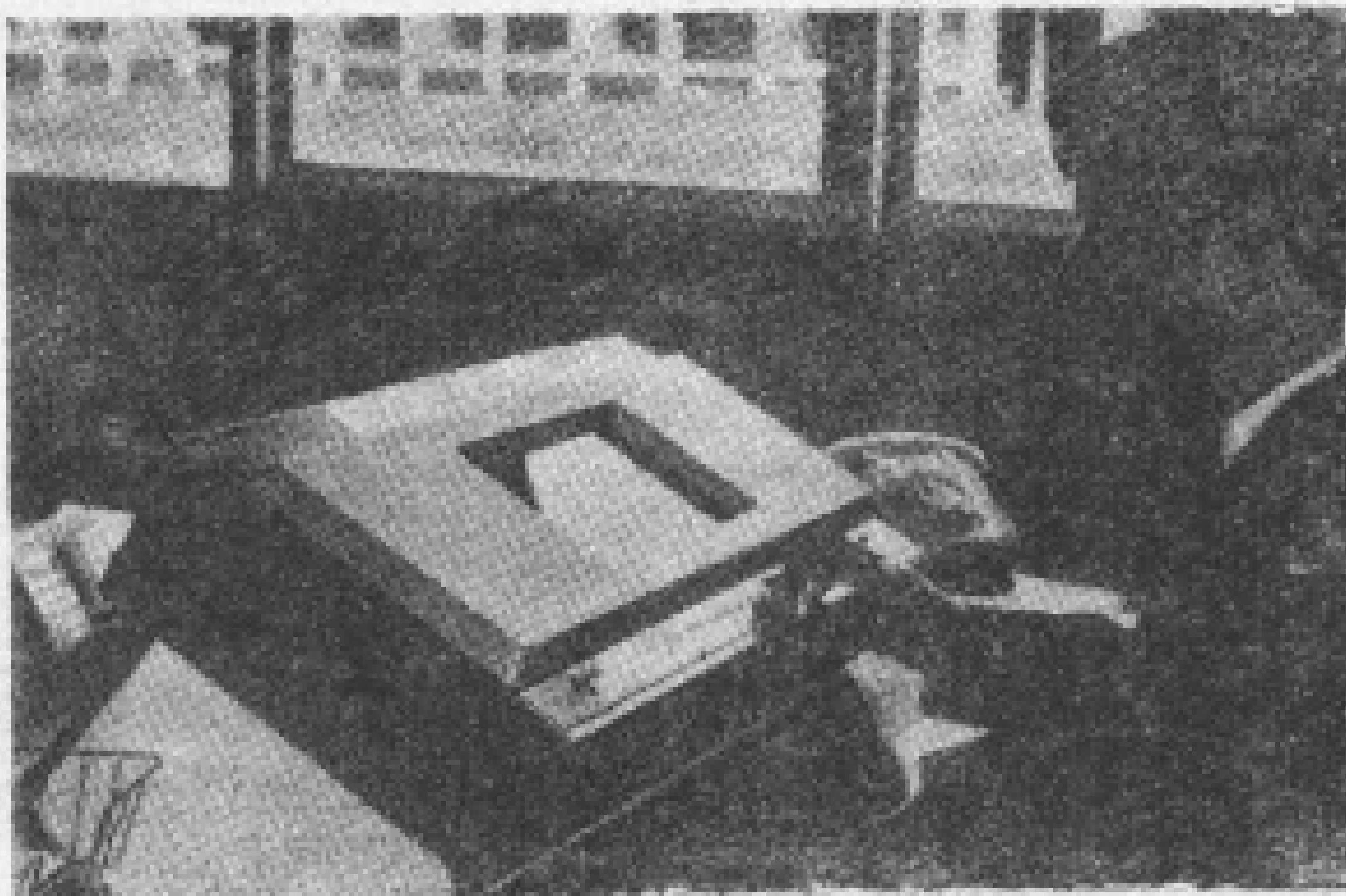
通常我们按图13.4来安排教学．这张图的组成中包括有，表示教学阶段的 O 类元素、表示测验的 E 类元素，以及标志教学阶段序列的连结．这张图里有两种连结：C 是对测验题的正确回答，I 是不正确的回答．从图13.4中可以看出，学习序列依赖于测验结果，仅当测验结果是正确的时候，才能转入下一个学习阶段，否则就必须重复以前的学习阶段，直到学生相当好地掌握了材料为止．

这种教学模式不仅能由教师来实现，也能由按图13.4编制的程序的教学机来实现．所需的教学序列，通过把必需的信息（课文、图画、照片）映射在银幕上或阴极射线管（电视）上，提供给学生．使用下列两种测验方法：选择答案或自我测验．第一种方法中，每个问题都附有一组可能的答案，其中有一个是正确的，学生必须按一个适当的按钮来指出他认为哪个答案是正确的．第二种方法中要求学生写出他的答案，然后按一个按钮，使银幕上映出正确的答案，此后他可以将这

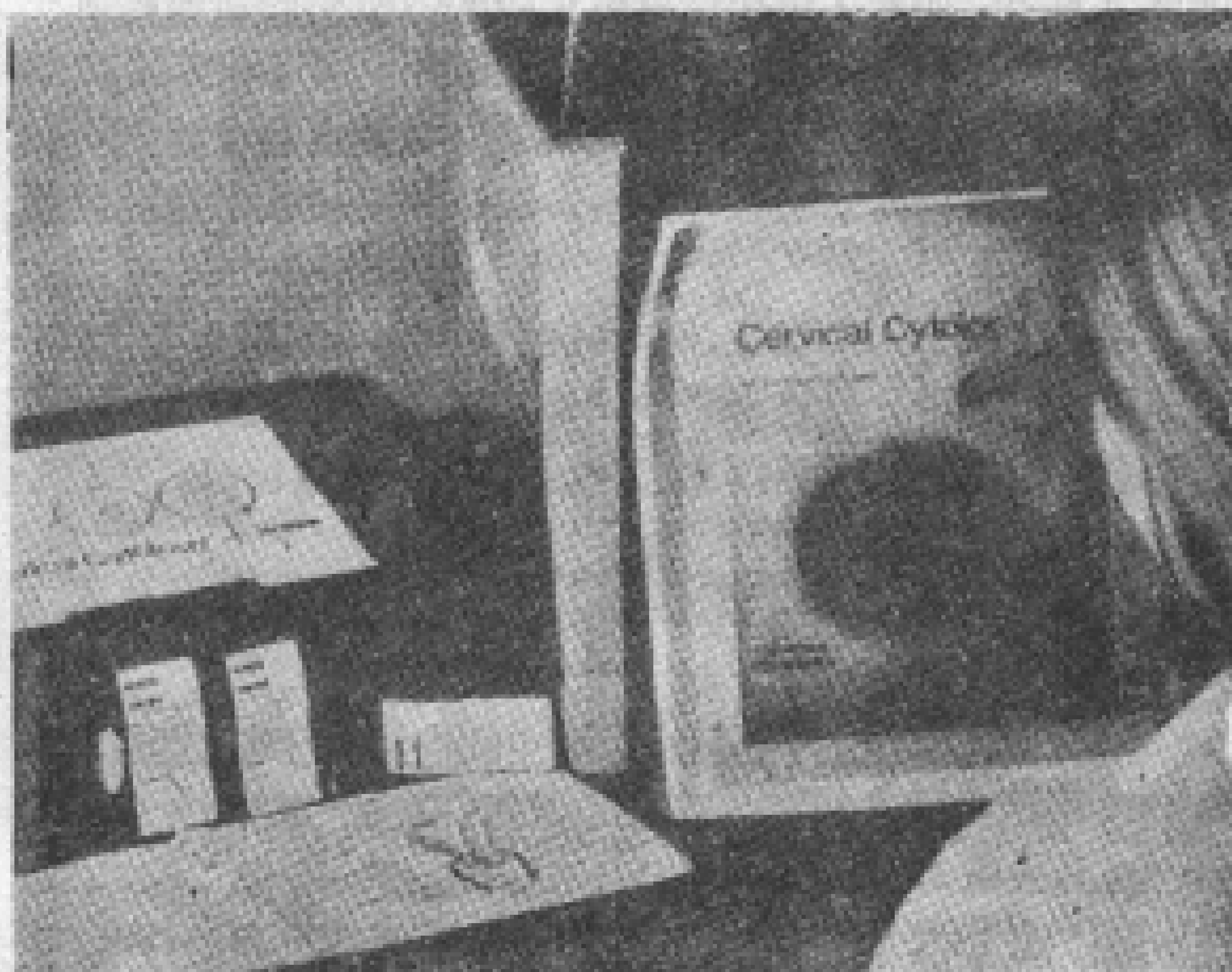


图 13.5　教学机(这几张照片承蒙 ESL Bristol 提供)

(a) 中学数学教学用 Auto Tutor (自我教师式)教学机。



(b) 训练管理人员用 Bristol Tutor (Bristol 教师式)教学机。



(c) 训练宫颈细胞学专家用 Auto Tutor 教学机。

两个答案加以比较。根据测验结果，教学就按图 13.4 继续下去。

为了教会习性，就要使用各种类型的训练器，它们模拟学习者必须解决的问题的条件。这种训练器已用来训练飞机和船舶的驾驶员，调试电子线路、操作穿孔机等。

如果教学的特性和速度选择得适应学生的个性：他的能力、气质、在解类似问题时积累起来的经验，那么习性教学就可以达到最大的成功。这种适应学习者个性的单个教学途径，可以用自适应教学机来实现。在设计自适应教学机时，所用的原理之一是，自动地测定一组问题，检测的顺序和速度则根据学生犯错误的性质和频率来确定。

例如，当一个学生在学习打字时，在训练期间给他的词或符号可以这样改变，使得它们更频繁地包含学生打错的那些符号。此外，如果学生在一段给定时间内所犯的错误超过一定数目的话，口授的速度可以自动地放慢。用这种方法，“学生-教学机”系统建立了一种动态平衡，其特征是在解决问题的精度和速度间建立起某种关系，这个关系使教学过程为最优。

如果要教一大批学生，同时又要留意到他们每个人，这种教学可以用数字计算机来组织，计算机的程序是按教学的任务和方法编制的。显然，这时，为了与学生交换信息，为了监视教学，必须配备专门的装置。

练习

1. 在以 x_1 和 x_2 为坐标的二维空间中给出了两类点。在表 13.2 中给出了这两类代表点的坐标（单位：毫米）。

画出这两类的分隔线，并写出这条直线的方程。

解：图 13.6 示明了 x_1, x_2 平面上这条分隔直线的作法，平

表 13.2

第一类												
x_1	30	35	40	35	35	45	45	50	55	60	55	60
x_2	25	75	60	45	35	40	55	65	70	60	50	65
第二类												
x_1	30	40	45	55	65	55	65	70	80	70	85	
x_2	15	20	30	30	35	40	45	25	20	55	45	

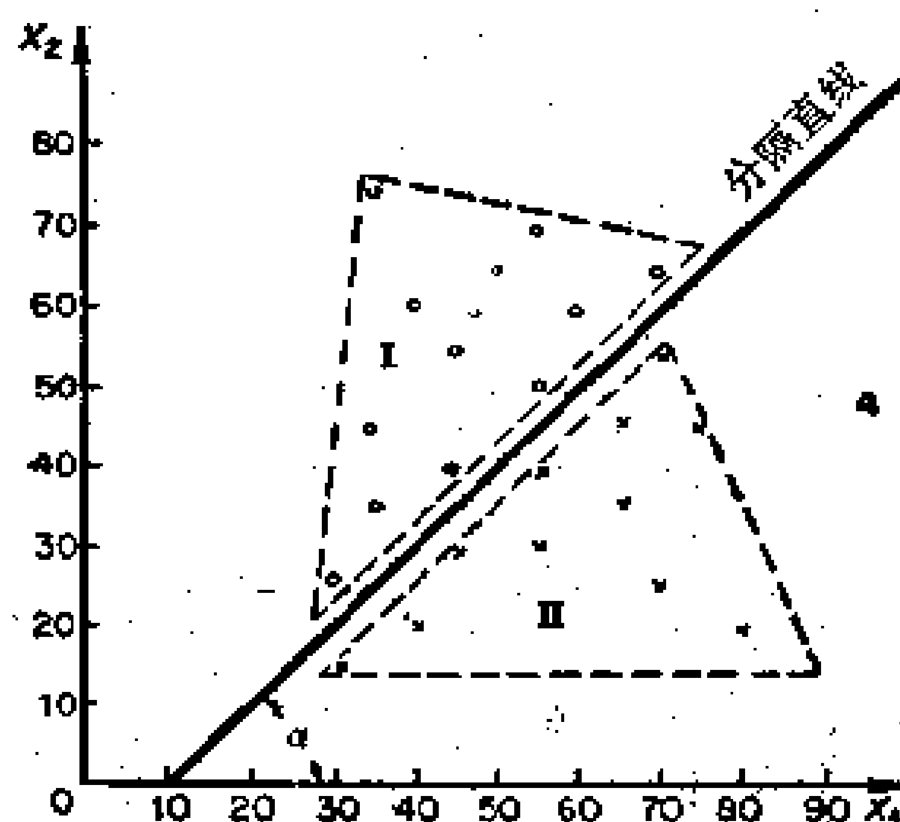


图 13.6. (第 1 题)

面上这条直线的方程可以写成 $x_2 = kx_1 + b$，这里 $k = \tan\alpha$。就本例来说，$k = \tan 45° = 1$，$b = -10$，直线方程是 $x_2 = x_1 - 10$。

2. 在钻油井时，产生如何根据间接的地球物理学数据，把含油层和含水层分开的问题。这些数据已列入一张表中，并用二进制码表示。这样的结果，对于每一地层得到一个 n 维二进制矢量。表 13.3 给出了含油层和含水层的码组合（在本例中矢量的维数是 $N = 18$）。请用第 13.1 节中给出的算法，对表 13.3 的码模仿教学过程，然后检查这个算法是否正确地划分了为教学而提供的那些地层。最后，确定表 13.4 中给出

的码表示哪种地层。(注：如果在解题过程中，有必要计算 log 0，那么不要把它的值取为 $-\infty$，而取为比如 10。)

表 13.3

第一类：含油层

地层号码	码：地层的二进制矢量																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
3	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
6	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
7	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
8	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0
9	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
10	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0

第二类：含水层

地层号码	码：地层的二进制矢量																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	7	18
1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
3	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
4	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
5	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
7	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
9	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0

表 13.4

地层号码	码																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
3	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
5	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
6	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0

解：计算一个地层属于第一类还是第二类用的系数表的型式，如表 13.5 所示。

表 13.5

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_0	+0.176	−0.067	0	−0.051	−0.051	+0.109	+0.109	−0.067	−0.176
R_1	−0.602	+0.125	0	+3.301	+0.301	−0.477	−0.477	+0.125	+0.602

	10	11	12	13	14	15	16	17	18
R_0	+0.125	0	+0.155	0	−0.301	0	+0.125	+0.051	−0.222
R_1	−0.301	0	10	0	+10	0	−0.301	−0.301	+10

对表 13.3 的码进行验算，我们发现对第 3，5，7 层（表 13.3，含油层)和第 2，10 层(表 13.3，含水层)来说，这一算法是错误的，对其他地层来说这一算法是正确的. 在表 13.4 中码 2，3，5 属于含油层，而码 1，4，6 属于含水层.

3. 我们给出一台自动机，它可以处于 1，2，3，4 这四个状态之一. 在状态 1，2 下，自动机执行运算 a，在状态 3，4 下，则执行运算 b. 在进行运算 a 和 b 后，自动机将分别以 $p_a = 0.1$ 和 $p_b = 0.9$ 的概率受到周围介质的处罚. 自动机在受到介质处罚后，从一个状态到另一个状态的转移图如图 13.7(a) 所示，而在不受处罚情况下的转移图，则如图 13.7(b) 所示. 同时考察两个图，就可以计算自动机从第 i 个状态转移到第 j 个状态的转移概率 p_{ij}（这些概率表示在图 13.6 中各箭头的上方）.

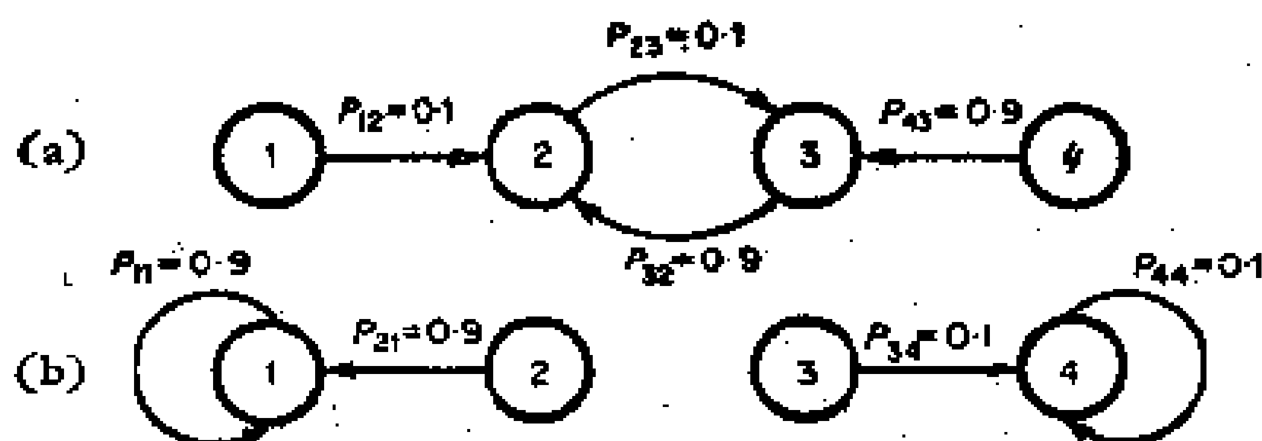


图 13.7. （第 3 题）

$$p_{11} = 0.9 \qquad p_{32} = 0.9$$
$$p_{12} = 0.1 \qquad p_{34} = 0.1$$
$$p_{21} = 0.9 \qquad p_{43} = 0.9$$
$$p_{23} = 0.1 \qquad p_{44} = 0.1$$

其他转移的概率等于0. 试把这台自动机的转移矩阵(对两种输入信号——处罚和不处罚——取平均)写成表的形式(表 13.6)。

表 13.6

i	j			
	1	2	3	4
1	0.9	0.9	0	0
2	0.1	0	0.9	0
3	0	0.1	0	0.9
4	0	0	1.0	0.1

这台自动机在时刻 $t+1$ 处于任一状态的概率是

$$p_i(t+1) = \sum_j p_j(t) p_{ij},$$

这里 p_{ij} 是自动机从第 j 个状态转移到第 i 个状态的转移概率，$p_j(t)$ 是自动机在时刻 t 处于状态 j 的概率. 在若干次循环之后

$$p_i(t) = p_i(t+1).$$

此外，所有最终概率之和等于1.

请写出方程组并计算自动机各状态的最终概率. 把这台自动机与第 11.2 节中所描写的自动机进行比较、计算这台自动机所受处罚的均值，并将它与不可教的自动机的受处罚均值相比较(所谓不可教的自动机，即不管介质的反应如何，所有转移都具有相同的概率)。

解：方程组可以写成

$$p_1 = p_1p_{11} + p_2p_{21} + p_3p_{31} + p_4p_{41},$$
$$p_2 = p_1p_{12} + p_2p_{22} + p_3p_{32} + p_4p_{42},$$
$$p_3 = p_1p_{13} + p_2p_{23} + p_3p_{33} + p_4p_{43},$$
$$p_4 = p_1p_{14} + p_2p_{24} + p_3p_{34} + p_4p_{44},$$
$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1.$$

从转移矩阵中代入值 p_{ij}，并解这一方程组，我们就得到：
$p_1 = 0.81$，　$p_2 = 0.09$，　$p_3 = 0.09$，　$p_4 = 0.01$.

这台自动机和第 11.2 节中的那台自动机是同一类型的，不过前者有四个状态而不是两个状态，在适应环境期间，这台自动机将受到的平均处罚是

$$p_{罚}^{*} = (p_1 + p_2)p_a + (p_3 + p_4)p_b = 0.18,$$

而对于一切状态都以相同概率出现的自动机来说，平均处罚却是$p_{罚} = \dfrac{p_a + p_b}{2} = 0.5$。如果自动机具有大量状态，处罚的均值就会降低而趋于 p_a，即自动机将几乎总是处于受罚可能性较小的状态.

第十四章 巨大系统

为了表达在提出并解决一些控制问题时出现的系统组方法，产生了"巨大系统"这个概念，它是控制论特有的概念．引进这个概念并不是为了把系统分类（即把系统分为"大的"和"小的"），而是为了制订控制系统行为的研究方法，是力求考虑到这样一种系统的全部复杂性的结果．

这种系统组方法还有一个突出特色，那就是，该系统作为整体也好，它的各组成部分也好，其行为中的不定性都在不同程度上被考虑到了．这种不定性是随机扰动和人类参与系统的结果，因为这种类型的随机因素是不能理想地由控制装置来补偿的．

和普通的局部概念相反，"巨大系统"这一概念所根据的事实是：任何系统，在考虑到它和其他系统的相互关系的同时，被认为是某一巨大系统的一部分．

所以，巨大系统理论的研究对象是这样一个控制系统，它被看作是一个由共同目的联合起来的、有内在联系的子系统的集合．巨大系统的特征是，这种系统有一些分离的部分，有人、机器和自然环境的干预，在系统各部分间有物质、能量和信息的联系，在所考察的系统与其他系统之间又有外部联系．

对许多经济学的、生物学的和工程的问题进行科学的研究时，这种系统组方法是不可少的．例如，如果不把一个蚁塚看作巨大系统，就不可能得出关于这一系统的合理结论．为了满意地控制一个动力学系统，就必须把自然能源（河流、化

学燃料和核燃料的位置、太阳能、风能)、发电站、变电所、传输线和用电户等看作一个巨大系统.

巨大系统理论还处在萌芽阶段，它的基本概念和术语至今还没有确切地建立起来. 所以这一章将只涉及少数几个问题. 但是它们都是重要的问题. 我们选择这些问题，主要是为了说明这一理论的任务，而不是为描述这一理论所得到的结果.

14.1. 巨大系统的控制问题

在巨大系统中发生的控制问题是极为多样的；可以把它们任意分成两类：运筹问题和功能问题. 运筹问题是和下列诸方面相联系的问题：选择系统各部分间的联结的结构，计划整体系统及其各部分(子系统)的行为的战略与战术，以及系统行为的分析和系统工作结果的评价等问题. 功能问题中首先是下面这种问题：有时在计划中不可避免地会发生某些没有预见到的情况，这时如何实现在解决运筹问题中作出的计划和策略?

例如，如果我们说的是控制一家制造厂，那么运筹任务就是

(1) 控制资源. 积累和维持储备(人力、材料和财政储备).

(2) 实现复杂的操作集合. 建造或改造企业、创造和利用新增部分的生产.

(3) 维持系统的工作能力. 设备和建筑物的维护和修理，提供人员的休息、医疗的保证.

(4) 利用资源. 调度参加系统工作的人力、材料和财政资源.

(5) 选择路线. 控制材料、半成品、部件的流动、分配动

力、控制信息的运动。

（6）工厂的发展。使活动方式、范围和规模变得越来越有效。

（7）选择竞争。在机构之间竞争、与自然作斗争。

（8）销售。研究需求、制订产品商标、广告宣传、价格控制。

14.2. 有效性判据

为了有效地控制任何系统，都必须有一种判据，这种判据可以指示出系统的行为和控制任务间的一致程度，如第六章中所述那样。

与对控制任务的传统提法相反，在巨大系统理论中，为解决这种控制问题所定义的有效性判据不能当作是已知的。对于每一项控制任务和每一个具体系统，都必须定义这样一个判据，它的数值表征控制的有效性。由于下列事实，要提出一个适用于巨大系统的判据的问题就更加复杂了，这个事实是，任何系统都是另一个更高阶的系统的子系统，是它的一个组成部分。但是，对系统的一个部分的控制决定于对它所属的那个系统的控制。所以从理论上说来，如果不引进全局规模的社会-经济因素的话，是不可能严谨地建立控制问题、并定义出控制的有效性的。

显然，以完美形式提出的这样一种方法意味着，不可能实际解决这种问题，因为它们太复杂了。但是注意到，只是提高研究水平的前几步，才对控制问题的性质和有效性判据起强的影响，所以对于具体问题，只要用以粗略的估值为基础的校正，来代替不断增高阶次的效果，就可能找到合理的研究水平。

如果有效性判据只考虑系统的瞬时状态的话，那么系统的控制将是非常原始的、无远见的。显然如采用一种解决办法，它只有到几世纪以后才产生效果，而且在这段时间内还要不断地付出经费，这也是不适当的。另一方面，一种非常短期的策略，它不允许目前受损失以期不久的将来会得到可观的利益，也是不合理的。显然，要选择一项有效的控制判据，就应当考虑在利益（或损失）和得到它所需时间之间，选择一个

合理的折衷判据。显然，作出的决定，将不仅取决于是哪些因素、在多大程度上包含在有效性判据的表达式中，还取决于分配给各个因素的加权数，这又取决于得到相应的收益和损失所需的时间。

为考察收益和损失如何随时间而扩展的一种可能方式，引进一个按问题性质选定的函数 $\theta(t)$。$\theta(t)$ 应当是个单调减函数，并且在有效性判据的表达式中作为因子出现。例如，如果建设一家新工厂有两种不同方案，而我们必须决定从中选择一种方案。对这两种方案 A 和 B 来说，它们在时间 $(0\sim T)$ 上的预期收入随时间变化的情况是不同的，其图象 $R_A(t)$ 和 $R_B(t)$ 如图 14.1 所示，这里 R 的负值表示支出。选择的判据是在时间 T 内的平均收入。假设我们并不知道图 14.1 中所画出的函数 $\theta(t)$ 的形状，把 $R(t)$ 的各纵坐标与合适的纵坐标 $\theta(t)$ 相乘，我们就得到导出收入值 $R_A^*(t)$ 和 $R_B^*(t)$ 的图，如图 14.2 所示，容易由这两个图确定时间 T 内的平均收入 $\bar{R}_A^*$ 和 $\bar{R}_B^*$，而这两个值就可以作为决策的基础。在

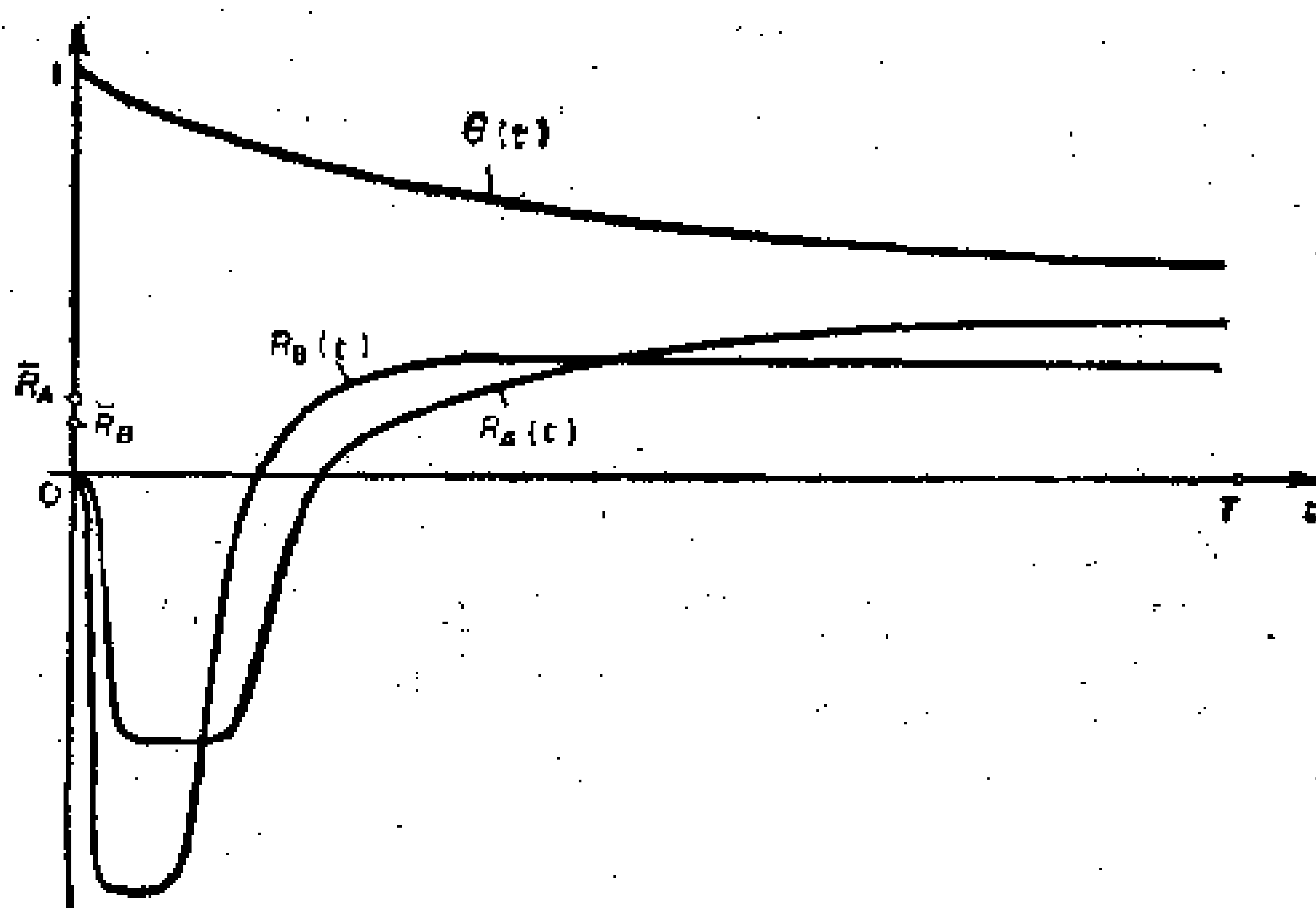


图 14.1. 得失函数变化图

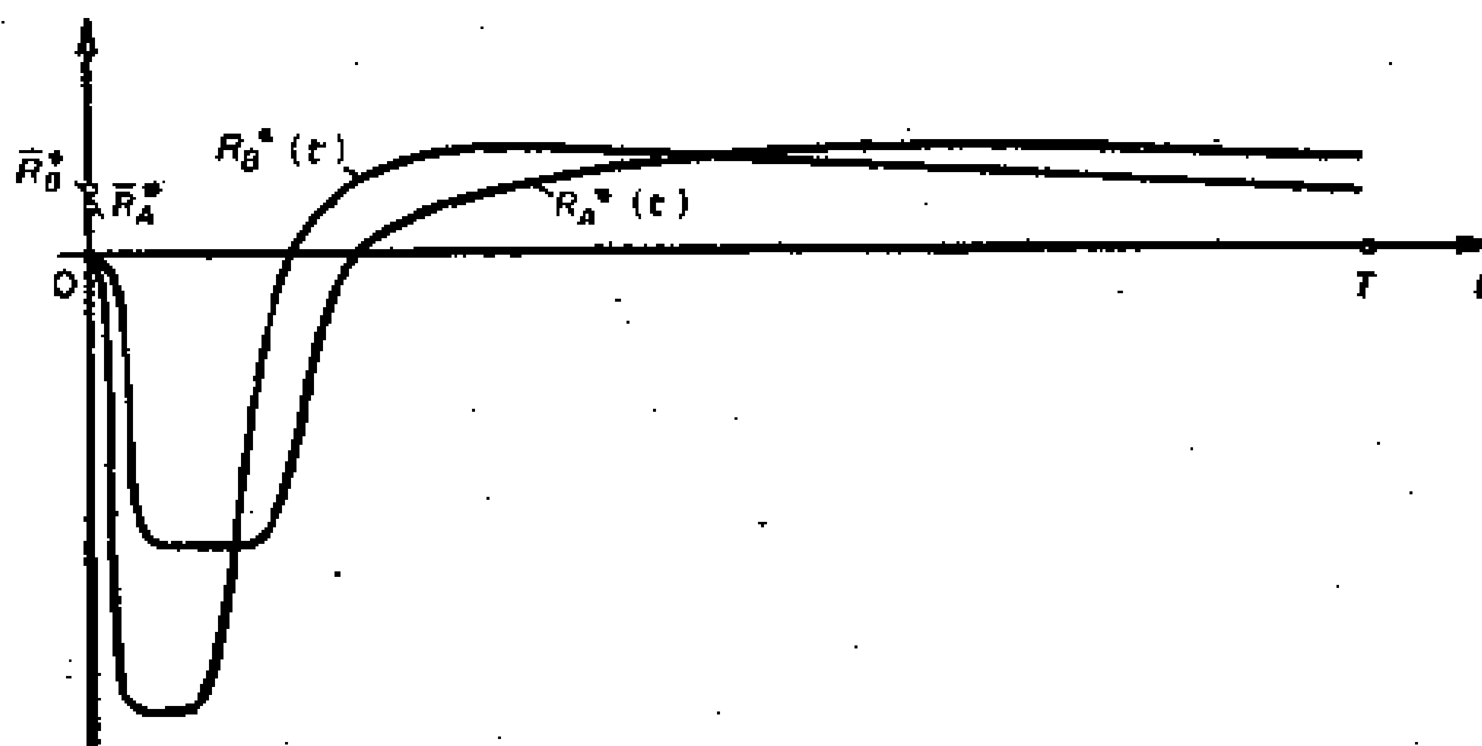


图 14.2. 导出收入值的图

本例中方案 B 看来更为有利．因为 $\bar{R}_A^* < \bar{R}_B^*$，尽管平均收入 $\bar{R}_A > \bar{R}_B$．

这个结果是考虑到下列事实而得出的，选择方案 A 的话，大部分收入的到手要迟得多．

从这个例子可以看出，在确定决策时，考虑到收益前要过多少时间，是多么重要．

14.3. 控制系统的结构

控制巨大系统的一个重要而复杂的问题是确定这个控制系统的合理结构．既然一批互相关联的复杂对象的控制是复杂的，乍一看去，似乎按集中控制原理来设计控制系统可能是合理的．

在集中控制系统中，关于各被控对象的信息，系统及其各部件的外部影响(激励)的信息，都馈入一个控制中心．根据系统状态和控制任务的信息，控制中心产生控制信号，并发给组成这个系统的各部分的那些对象．没有经验的人甚至会把这种控制系统看作是理想的，因为这时关于系统的所有信息都集中到一个控制中心，所以在原理上就有可能准确地计算

有效性判据的值，从而保证最优控制．但是，实际上这种观点是错误的．首先就是，集中控制系统是很难实现的．为了有效地控制哪怕一个这样的对象，也必须取得并加工非常多的信息，而对于含有大批对象的系统来说，信息量还要相应增加．所以就必须在控制中心里集中大量的不同信息，并保证有效地对它们进行加工．加工的主要目的是确定系统的最优工作．

在第十一章中已指出，探索一个系统的最优工作的问题，归根结蒂是决定函数的极值，这个函数是表征控制的有效性的判据．随着函数的自变量个数的增加，亦即随着最优化系统的状态空间的维数 n 的增加，求极值的困难也急剧地增加．在集中控制系统里，必须在一个很高维的空间内，解决探索最优化的任务（n 可能是以百以千计），这就会导致难以克服的计算困难，正象在第 10.5 节中已指出的那样．此外，即使有可能求出这种或那种复杂系统的最优体制，也需要极长的时间，而且要经过很长时间的滞后，才能得到控制作用．所以数据加工设备的能力，限制了有效地对一组复杂对象进行集中控制的可能性．

我们还要指出，集中控制系统的一个特性是结构的高度的刚性，因为对随机变化和由系统和环境的演变所引起的变化的适应，不是出现在系统的各部分里，而仅仅出现在控制中心．集中控制使得系统长期地保持稳定，抑制住波动和系统各部分的演变，而且无须改造它们．但是归根到底，这种做法或许正在破坏这个系统，因为系统的不变结构和进化演变间的矛盾将增加到巨大规模，以致可能需要彻底而急剧的改造，但在给定结构的框框里这是做不到的，从而将导致系统解体．

集中控制减少了系统的工作的可靠性．控制中心的工作

中出现的错误不可能得到纠正，并且会剧烈地影响到整个系统的状态。这样，集中控制系统与其他系统相比就处于不利的地位。例如，生物系统中就不存在这种集中化。不妨想象一下，如果脑子必须控制体内各细胞的每一个新陈代谢动作时会怎么样吧。做到这一点的不可能性是显然的。恰恰因为各细胞的生活活动几乎完全服从核酸的自治控制，动物体才能这样成功地履行职能，才能这样细致入微地、灵活自如地适应外部变化和体内变化。

在人类社会的历史中，集中控制造成了社会和经济的停滞不前，这种社会结构是注定要失败的，迟早而已。这种集中化的一个典型例子是南美洲印加人的经济。在那里整个社会生活、经济生活和私生活都受到严格控制。象农时安排和耕作方法等随便什么活动，都只能根据最高统治者——印加沙帕——的训令来进行，而且一定要无条件地执行这种训令。结果有 20 万大军的印加帝国，却被西班牙征服者比查罗(Pizarro)的 168 人的分遣队轻而易举地打败了。

集中化的结构的上述缺点，在相当程度上可以通过在控制系统中使用**等级结构**来克服。等级结构的一个特性是逐级地把系统分为子系统，在子系统之间建立从属关系。较高级的控制装置控制这个系统的等级较高的子部分，各子部分又有它们自己的控制装置，每个这样的子部分又分为等级较低的部分，它们也有适当的控制装置，如此下去，直到已分为系统的基本子部分，再分下去就不适当了为止。图 14.3 给出了控制的等级结构的例子。整个系统以这样的方式分解为从属部分，使各部分都包含了彼此结合得最紧密的那些对象。换句话说，分解是把“弱”联结断开的结果。

在具有等级控制结构的系统中，低级设备应当决定比较简单的局部控制问题，这些问题不超过具有加工有限数据能

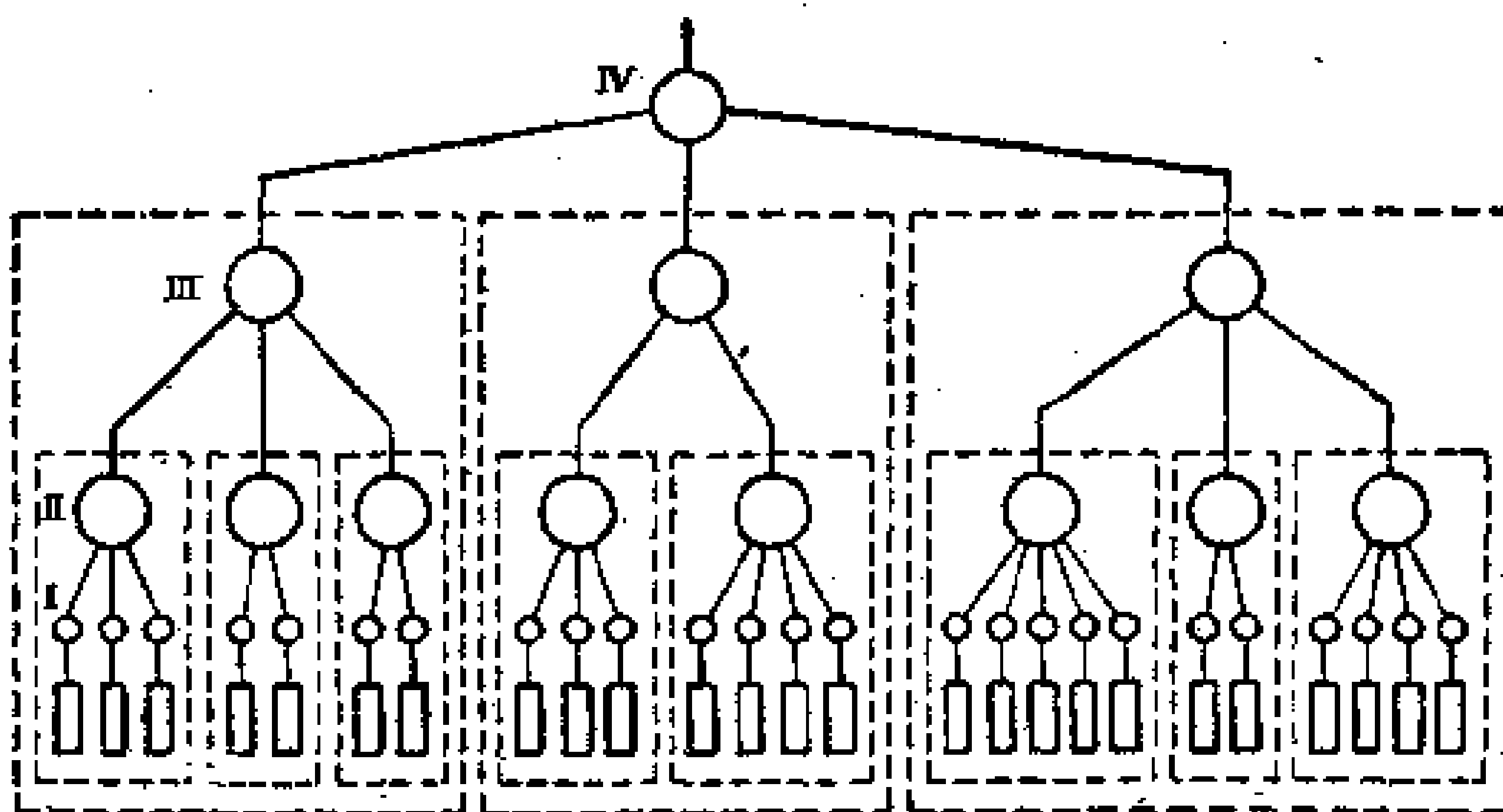


图 14.3. 等级控制结构

力的控制装置的能力范围。因而留给上一级控制装置处理的只是这样一些控制问题，它们仅需协调基本对象的工作，而要解决这些问题，只要掌握关于各个对象的状态的不太详细的信息就可以了。以上说明也适用于更高级的控制装置，所以它们要加工的信息量大大减少了，这就能与它们的信息处理能力相适应。

关于控制系统状态和它的各部分状态的信息，是以越来越概括和越系统化的形式，从下级系统传输到上级系统。因此第一级的控制装置得到关于对象状态的最详细的信息，而随着我们转向越来越高级的等级，这个信息就按问题的性质而一般化了。

在具有等级结构的系统中，控制指令是由高级的控制装置以最一般化的形式产生的，随着这些指令传到低级的控制装置，它们就越来越具体、越详细。具有等级结构的系统是在生物的、工程的和经济的系统的自然发展中形成的。目前在所有的复杂系统中，都可以观察到这种系统，象国民经济。

不要以为对一个等级结构必须预先就作出假定，高一级

的控制装置是以系统的特殊部分的形式独立出来的，它们与低级控制装置相比，是处于“较高级的位置”的。相反，在许多情况下，某些第一级的装置一起构成第二级的装置，一些第二级的装置又构成第三级的装置，等等，这样的结构将是最好的，如图 14.4 所示。

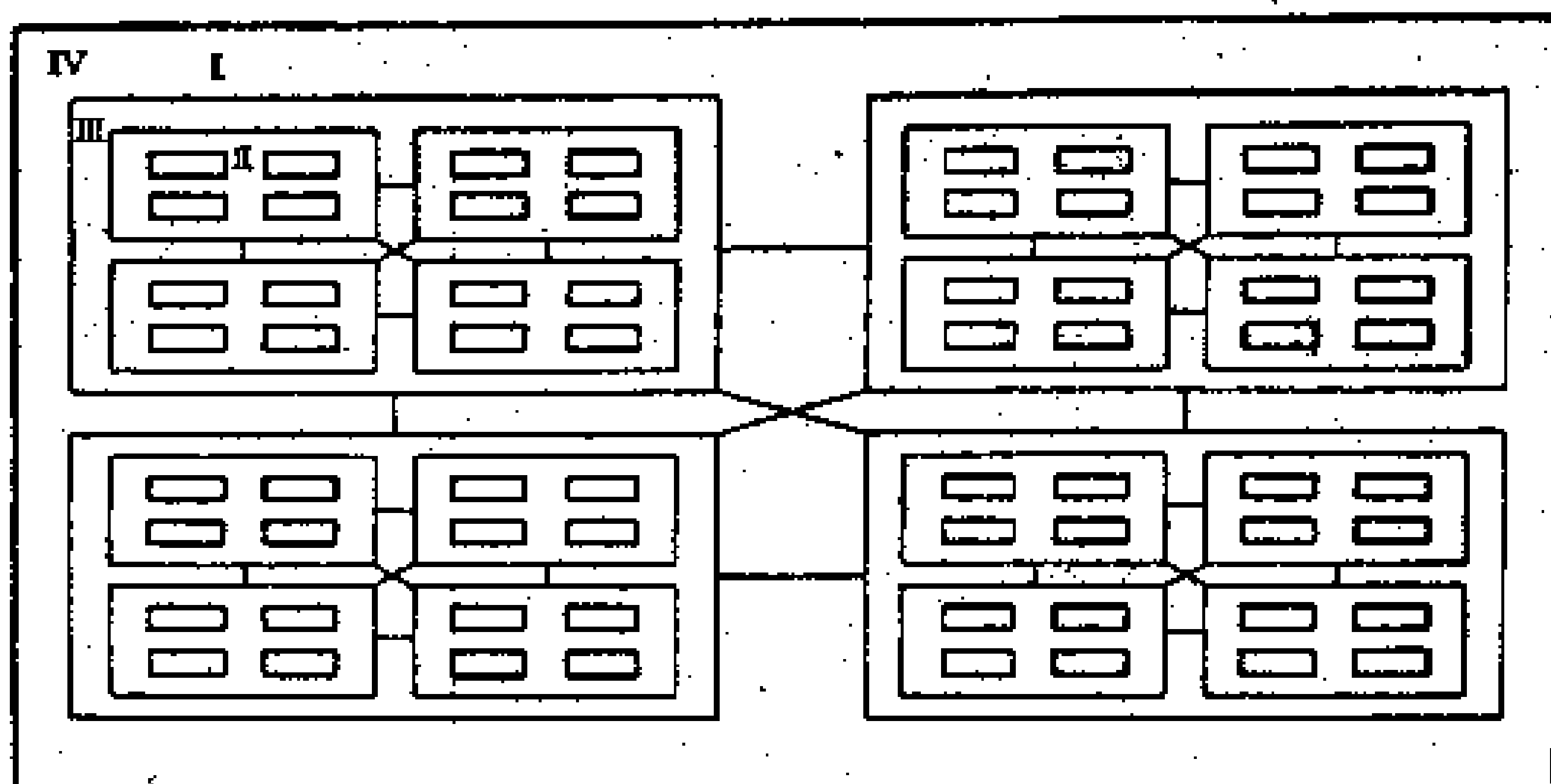


图 14.4. 把低级系统和高级系统结合起来构成等级系统的原理

以投票方式为基础进行决策的可能性，是 J. 冯·诺伊曼首先指出的。这样就大大地增加了系统的可靠性。

苏联科学家柯尔莫戈洛夫和奥夫曼（Офман）的工作表明，如果在一个系统中，所有元素都有绝对“平等的权利”，而每一个元素只和少数几个别的元素相联结，那么在有足够多个元素的情况下，这样一个系统可以解决任何别种装置能解决的、不管多么复杂的问题（即这种系统是所谓万能自动机）。

有理由假定，在人脑中就用到以逐级结合子系统为基础的等级结构。

14.4. 等级结构的设计

要用数学方法描写一个巨大系统（例如一家工厂）的工作，常常是很难的，甚至是不可能的。但是总要控制这种系统，以使它的活动结果满足某一判据。以使用严格的数学方法为基础的控制，有时复杂得即使用了现代的大型计算机也无法解决。在这种情况下，可以采用模拟人类控制活动的想法，人类在作出决策时部分地出诸直观的考虑。已经发现，大多数人都下意识地用相同的方法来解决所发生的所有复杂问题；这种方法叫做启发式方法。有的启发式方法只适于解决某些有限的问题，但是有的启发式方法则适于解决很广的一类问题。

一个可以用来控制巨大系统的一般启发式方法如下。我们把一个巨大系统的控制装置想象为部件A的形式(图 14.5)，在它的输入处馈入下列信息：关于控制目的的信息 X_0、关于系统现时状态的信息 X_A，以及关于加给控制的约束的信息 R_A。部件A的工作结果是一个输出，或输出算子 y_A，它可以采取命令、指令、程序等形式。如果这种算子还不足以有效地控制该系统，那么控制装置A可以以某种方式把这种算子分为一组较简单的算子 $y'_A, y''_A, \cdots, y_A^{(n)}$，同时把这些算子传输下去进行解码，并更详细地提交给较低控制级的部件 $B_1, B_2, \cdots, B_n$。现在传输到下一级的算子集就成为部件 $B_1, B_2\cdots, B_n$ 的目标了。为了达到这些目标，这些部件需要关于系统状态的更详细的信息 $X'_B, X''_B, \cdots, X_B^{(n)}$，而且可能有约束 $R'_B, R''_B, \cdots, R_B^{(n)}$ 加在这些部件上。

第二级部件的工作结果是算子 $y_{B1}, y_{B2}\cdots, y_{Bn}$。如果必要的话，还可以把它们分成部件并称之为子目标(子路线)，送进下一级的部件。这一等级结构可以一直延续下去，直到馈

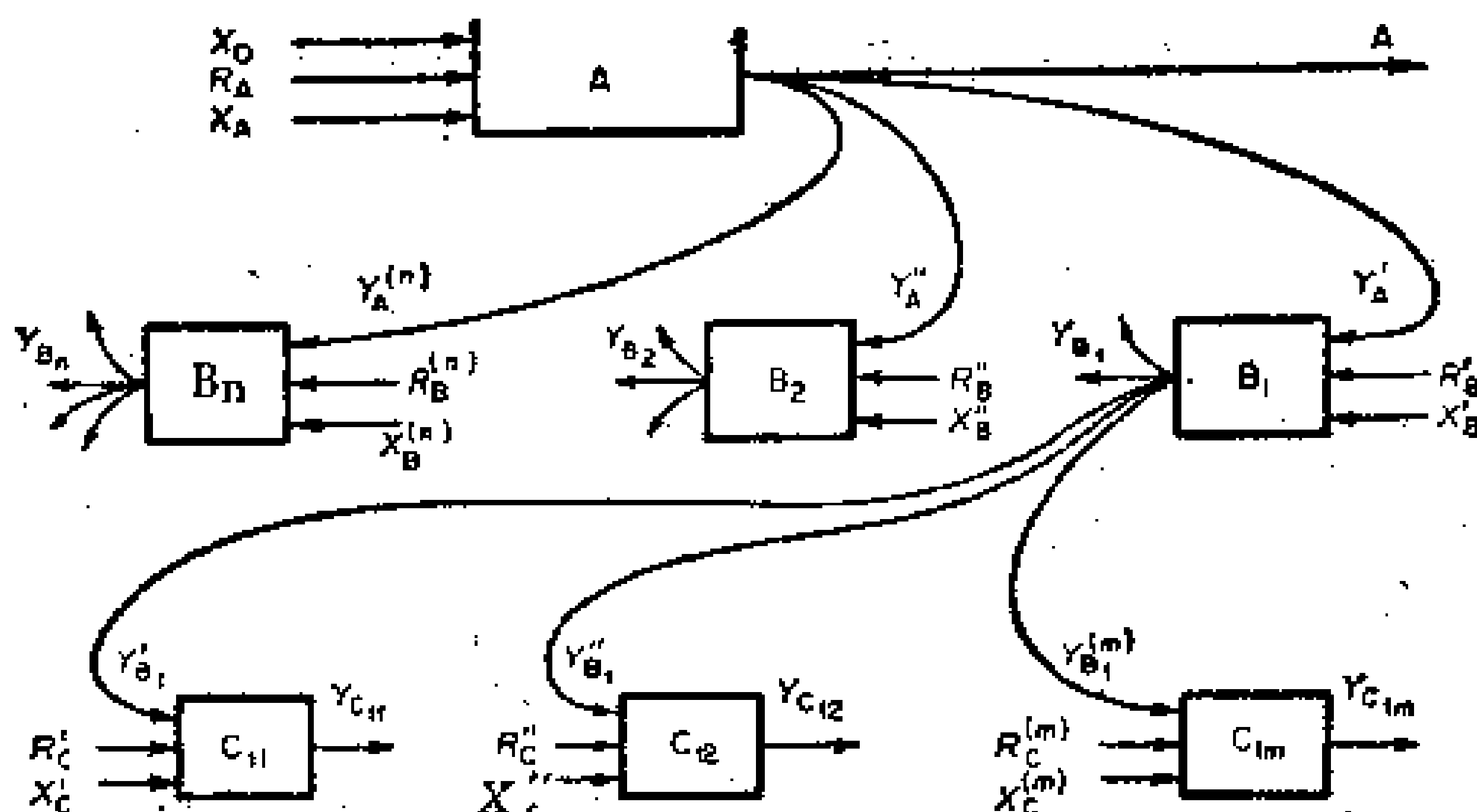


图 14.5．对一个巨大系统进行控制的图

入该控制系统的控制作用适于系统进行所需的工作——使目前的状态 X_A 接近目标状态 X_0——为止．应当指出，对于这样组织起来的控制系统来说，不必把它收到的所有输入信息都送进最低级的部件中去，也不必把某一级的每个部件的信息送到更高级的所有部件中去．例如，关于系统 X_B 的现时状态的数据，应当包含来自和部件 B_1 相联结的低一级部件 C_{11}，C_{12}，$\cdots$ 的信息，以及为形成复合(语句)算子 y_{B1} 仍然需要的信息．

这样一来，为各较高级的部件所收到的，关于该系统状态的信息，已经为较低级的部件过滤过了．这大大地减少了馈入各部件的信息量和加工时间，并使我们能在可接受的时间内、以可接受的资源消耗，求出一个解或一个控制作用，当然这样得到的解并不总是最优的，甚至不一定接近最优解，但是在大多数情况下，对可利用的时间和资源的限制是如此之大，以致为了得到一个可接受的解，我们就不得不牺牲最优性了．

14.5. 统计模拟[蒙特卡洛(Monte Carlo)法]

由于巨大系统的行为极为复杂，含有不定性，要研究它们的性质、研究它们对介质特性变化和各个元件变化的反应，是非常困难的。

为了研究现有的这类系统，显然可以采用实验方法，观察它的行为(被动实验)，或者观察它对不同类型的、专为研究目的而产生的扰动的反应(主动实验)。通常对真实系统进行实验研究是代价极高的，而且受到工作条件的限制，这些限制指的是，不可能在非常条件下，例如在破坏或出事故的时候，探测系统的行为。此外，这种方式不适用于再发展的系统，这种系统的性质应当按照系统的建立方式来评价。

由于上述困难，人们常常用**统计模拟法**来研究巨大系统的行为[1]。

统计模拟法的原理是，在所研究的系统的模型中模拟随机事件。通常用数字计算机来实现统计模拟。在计算机里馈人关于要模拟的系统和外界介质的已知性质的数据，随机因素由一个具有给定统计性质的随机值源来模拟。这种随机值源是一张随机数表或伪随机数表，表是由计算机根据专门的算法产生的。

统计模拟法的一个重要性质是，问题的每个**个别解**本身并不表征这一系统，它是一个随机量。只有得到了**大批**个别解，并将它们**平均**之后，才能确定所寻求的关系。

统计模拟法使我们能够成功地解决这样的问题，例如，确定各次重新调整设备之间的最优周期，以保证产品的质量保持在容许限度内，又如，在排队系统中预测各队的大小，这样

---

1) 这个方法也叫做统计试验法或蒙特卡洛法(起源于蒙特卡洛城，这个摩纳哥城市有着世界上最大的赌场，特别是搞轮盘赌)。

的例子有：运输系统，中间产品在流水生产中的参数公差的最优分配。

为了说明，我们用统计模拟法来解决一个比较简单的问题。

我们假设，某装配工有一大批元件可以选用，其中有一半的尺寸比额定尺寸大，一半的尺寸比额定尺寸小。在装配时，每个部件都由三个元件组成，仅当三个元件都偏大时所装成的部件的正常功能才受到损害。现在要确定，如果这位装配工随机地从容器中取出这些元件的话，他装成一只合格部件的概率是多少？可以用解析方法来解这个问题。用 p 表示随机取出的元件尺寸偏大的概率，那么装成一只合格部件的概率 $p_{合格}$ 可以用下列公式计算：

$$p_{合格}=1-p^3=1-\left(\frac{1}{2}\right)^3=0.875.$$

这个问题可以用通过掷三个硬币实现的统计模拟法解出，例如，可把有国徽的一面（正面）看作"+（偏大）"，把有币值的一面（反面）看作"－（偏小）"。如果同时掷三个硬币得到三个正面，那么就假设装好的机构不能正常工作，而对于其他所有的组合来说（两正一反、一正两反或三个反面），装好的部件是能正常工作的。如果把掷钱币试验重复许多次，并估计概率 $p_{合格}$，就可以看到，这个概率将接近于0.875。

如果统计模拟是用计算机实现的，那就可以在一段可接受的时间内，解出非常复杂的问题，包括上述例子那类的问题，但其中是把大批元件装配成复杂的机构。用蒙特卡洛法来得到许多非概率问题的数值解也是非常有效的，例如计算多维积分、解复杂的微分方程组、找出最优设计方案，以及许多别的问题。

14.6. 排队

在解决与控制巨大系统有关的问题时，常常遇到这种情况，必须考虑到工程装置的全部生产能力，又必须确保这种装置的最优控制。为了解决这种问题，通常要用到概率论的一个部分——排队论。

例如，在复杂的生产单位中，各种类型的装置(反应器、机床)都应当在一定时间内完成规定数量的工作，即服务、供应、机械加工、制作一定量的原材料，同样，也可以把工厂的各部门(工段、加工场、车间等)看作适当的服务部门，它们在一定时期内应当完成(执行、加工、制造)一系列的操作(一批定货、元件、原材料、组件等)、在更高层的经济单位——工厂、公司、工业部门、经济委员会——显然也可以看作排队系统。

在规划这种系统的工作时，必须考虑到生产能力、单位时间内能完成的定货数、定货的排队时间等。显然，各个单位和子单位的工作的技术-经济指标将依赖于这些特征。预测可以完成多少定货的准确度，将决定计划制订得是否正确，计划是否完成得了；等待时间将决定要多少仓库和其他设备来贮藏等待处理的半成品，与此有关的还有周转设备的数量和周转速度。

我们来看一个简单的排队问题，某地电报局收到“特急”电报的频率 λ 是每小时两封 ($\lambda=2$)。每封电报一接到就马上派邮递员送交收件人，设邮递员送电报的平均来回时间是 $\mu=2.5$ 小时。这个排队系统的一个重要特征是，同时在路上的邮递员的平均数 (a)，以及有 k 位邮递员同时忙着的概率 (p_k)，同时忙着的邮递员的平均数，随着要送的电报的密度的增加而增加，又随着从电报局到收件人的距离的增加而增加。

因为每小时的电报数和投递时间是独立的随机变量，所

以需要的邮递员的平均数 a 是电报密度(频率)与平均投递时间之积:

$$a=\lambda\mu=5.$$

对本例来说,有一大批邮递员同时忙于投递,或者人人都闲着的情况,是不大会有的。k 位邮递员同时在投递的概率的准确值,可以按下列公式确定:

$$p_k=\frac{a^k e^{-a}}{k!},$$

这称为普瓦松(Poisson)分布。对于 $a=5$ 来说,这个函数的形状如图 14.6 所示。最可能的情况是同时有 a 和 $a-1$ 位邮递员在投递,即相应有 5 位和 4 位邮递员在投递,这个概率 $p_5=p_4=0.175$。所有邮递员都闲着的概率是 $p_0=0.0067$。

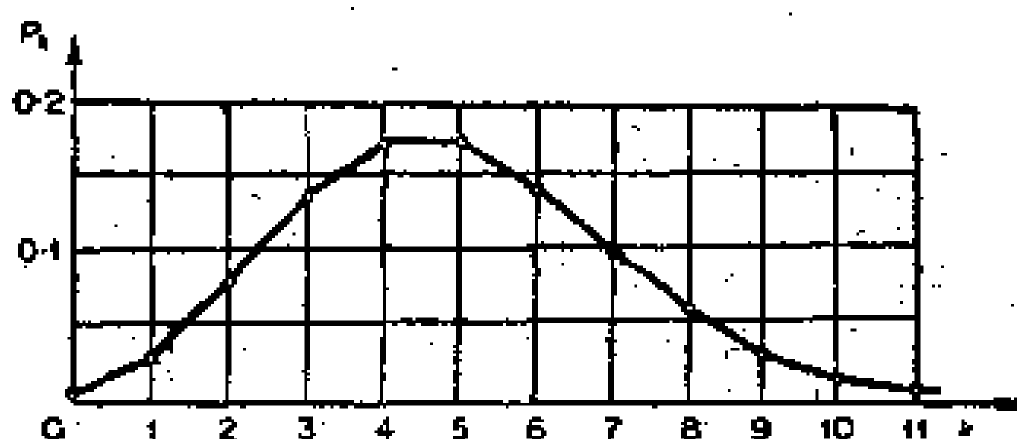


图 14.6. k 位邮递员同时忙着的概率分布

如果工作时间共有 1000 小时的话,那么只有 6.7 小时出现所有的邮递员都闲着的情况。

排队论的大多数实际问题是这样的复杂,以致要么不能用解析方法解出,要么所得到的公式过于烦琐而不适宜进行计算。在这种情况下,用蒙特卡洛法是极其有效的,因为它可以用快速计算机来进行。

练习

1. 要控制一家大企业的动力系统,试列举这时发生的运筹问题和功能问题。[这个动力系统由一个发电站、配电站、

蒸汽锅炉、(空气)压缩机、电、热、空气的输配线、抽水站和一个调度台组成]。

解：运筹问题：调度人力、材料和财政资源；改造这个系统的管理；设备维修，安装工作，改装；调度控制(分配各种动力到企业的各部门去，运进燃料，运出成品，在这个系统内外交换情报)；为职工提供休假和医务；训练职工；改善工作条件；在企业内部组织竞赛；应急工作。

功能问题：确保各个单位所需工作条件；坚持以规定次序开关设备、线路、配电站、水泵等；依照负载图操作。

2. 正在设计一个把电力供给几个地区的系统，它包括许多发电站、输电和配电系统。假设在这个系统中广泛地使用控制机(计算机)。那么应当选择什么控制结构来控制这个系统？为什么？是否使用了控制机(计算机)？(见图 10.7)。

解：最好选择如图 10.7(b) 所示的结构。其中除了一台总控制机外还包含局部控制装置。这样一个控制系统将有若干等级水平，而总控制装置将能够有伸缩性地作为一个整体来控制这一系统，而不干涉各个发电站和配电站的控制细节。

3. 出版社的一个部门每月平均收到两份稿件。每份稿件收到以后就送给一位审阅者，平均审阅时间是两个月。

试确定平均有几位审阅者同时在工作，并确定平均人数不超过 9 人的概率。

解：审阅者的平均数是 $a = \lambda\mu = 4$。同时忙着的审阅者不超过 9 人的时间就是下列时间之和：所有审阅者都闲着的时间与共有 1，2，……，9 人同时忙着的时间。所以所求概率(按图 14.6) 是

$$p_{\leq 9} = p_0 + p_1 + \cdots + p_9 \approx 0 + 0.03 + 0.08 + 0.14 + 0.175 + 0.175 + 0.15 + 0.10 + 0.07 + 0.03 = 0.95.$$

所以只要 9 位审阅者就够了的概率是 0.95。

第十五章　运筹控制

在巨大系统中产生的运筹问题具有独特的性质，所以需要专门的方法来解决．运筹问题有一个重要性质，就是控制者通常是一组执行人员，他们拥有用来达到一定目的的适当技术手段和设备．应加以控制的对象可以是营造工厂企业的承包机构；可以是某种新汽车的设计单位或解决某一专题的一组科学家．

一组执行人员为达到一项目标而进行的活动，我们定义为一个运筹．一项运筹总是可以分成若干步骤的，执行这些步骤对于整个运筹的实现是必要而充分的．工作的各单独步骤，运筹的各部分，一方面由各种条件互相联系着，这些条件限制完成工作顺序的选择，另一方面又由总人力、材料与财力资源互相联系着．

为了有效地控制一项运筹，必须解决下面两种问题：(1)制订实现这项运筹的最优计划，(2)确保在变化的条件下尽可能接近最优计划来实现它．

只有当可以找到一个数学模型，它足够清楚地反映对象的性质和特征，并适于用形式化方法来研究时，解这些问题的科学方法才能找到． 解决运筹控制问题的最方便、最广泛使用的模型之一是网络模型．

在这一章中我们将考察用网络模型(PERT)来解决的一些运筹控制问题．

15.1. 网络模型

运筹的网络模型(简称为"网络")是一种特殊类型的图，即无围线的有限有向图. 为了说明这个定义中所用的术语，我们要简单地谈一谈与图论有关的知识.

所谓图，我们理解为平面上用连续线连接起来的一组点，或节点. 如果所画的连线上附有箭头，这些箭头把顺箭头方向和反箭头方向的运行区别开来，那么这种图就叫做有向图. 用线连起来的那些点叫做图的顶点. 如果一个图具有有限个节点，它就叫做有限图. 图 15.1 给出了有限有向图的一个例子. 我们对每个节点都标上一个数，连线则记为 (i, j)，i 和 j 是连线两端节点的号码. 前一条连线(边)的终点与后一条连线的起点重合而形成的连线的序列叫做路. 围线是起点与终点重合的路，我们不允许图中有围线(或环). 图 15.1 含有围线 1—3—4—1，所以据定义，它不是网络.

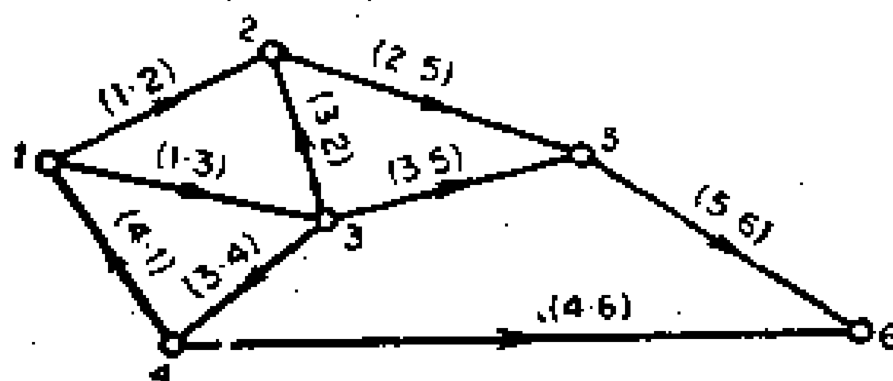


图 15.1. 有限有向图

在网络运筹模型中，边(连线)通常表示运筹——工作——的单独步骤；节点表示事件，事件标志着运筹的某一步骤的结束. 在所考察的网络中，有两个事件可以区分出来，开始事件和最终事件. 在网络模型中，工作概念可以有几种理解：它可能指一项需要劳动力、材料资源和时间的具体工作，也可以指一个等待，它不需要化费劳动或资源，但是需要一定量的时间，最后，它也可以指虚设工作，它既不要化劳动或资源，也

不要化时间，但是它指明在某一事件出现之前不可能开始某一工作。

作为网络模型的一个例子，我们来看一项比较简单的运筹：把一台电动机安装在底板上，这项运筹包括下列工作：

1. 定购底板。
2. 加工底板。
3. 把底板运到现场。
4. 准备底板下的基础。
5. 为底座造围框。
6. 为底座浇混凝土。
7. 硬化混凝土。
8. 安装底板。
9. 定购电动机并由仓库发货。
10. 把电动机运到现场。
11. 安装电动机。

根据由工艺因素决定的操作序列，可以画出如图 15.2 所示的网络。这一网络的结构反映了准许开始各项工作的条件，其法则是：从网络的第 i 个节点出发的工作，只能在进入第 i 个节点的一切工作都已完成以后，才能开始。在本例中，节点(事件) 6 "包含"两项工作："运底板"和"硬化混凝土"，从

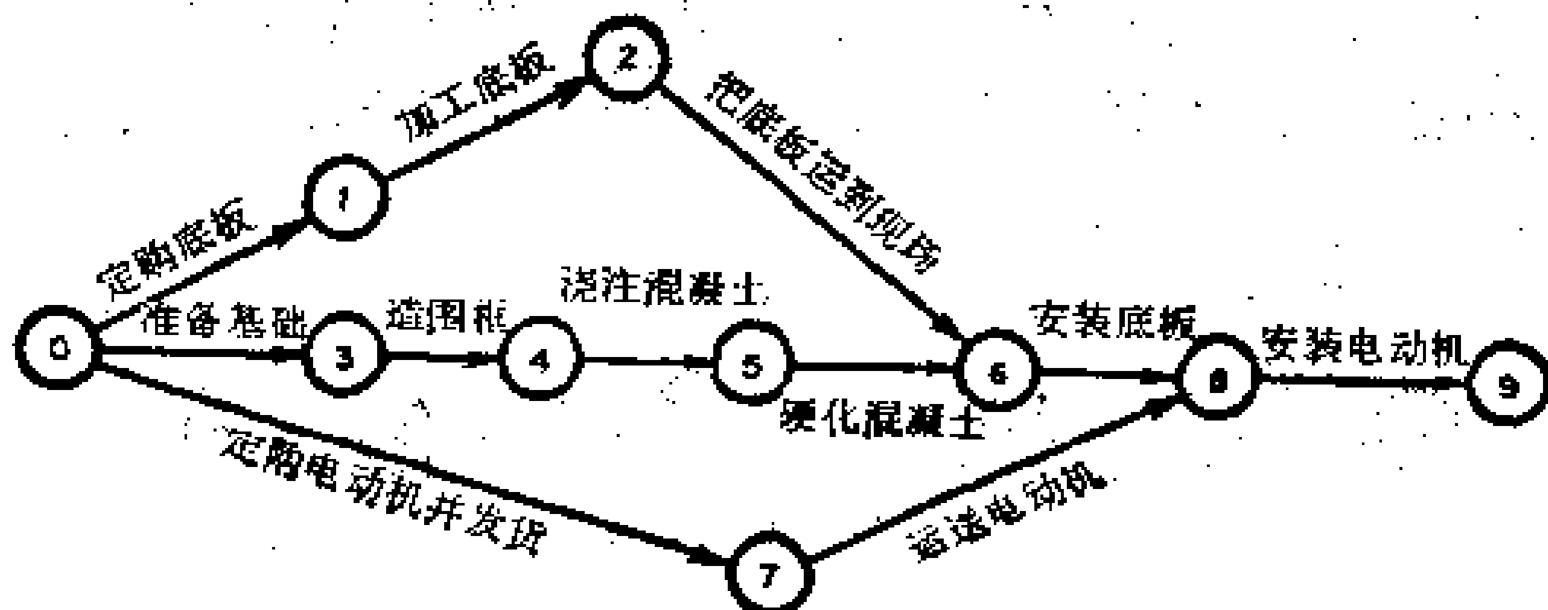


图 15.2. 表示安装电动机的网络

此出发的是“安装底板”．这意味着只有在底板已经运到和混凝土已经硬结以后，才能安装底板．

这时网络各节点表示的事件具有下列意义：

0. 决定动工．**运筹开始**．

1. 底板已经定购好．

2. 底板已经加工好．

3. 底板的基础已经完成．

4. 围框已经造好．

5. 混凝土已经浇好．

6. 安装底板的一切准备工作都已就绪．

7. 电动机已经定购好．

8. 安装电动机前一切准备就绪．

9. 电动机已安装好．**运筹结束**．

组成这项运筹的工作项目，是用完成它们所需的一定的时间值和资源值来表征的．我们将只考察网络的时间估值，所以我们可以只考虑事件 i 和 j 间的每项工作 (i, j) 所化费的时间 $t(i, j)$．完成一项工作的时间很少是能以高精度来预测的；我们只能估计在一定时间期限内完成每项工作的概率．但是为了粗略地计算，可以采用这项工作的某一平均预期持续时间，我们在网络模型中就用它来表征这项工作．对于本例来说，图 15.3 给出的网络模型中附有工作项目的时间特性．工作的预期持续时间是以天数记在网络的每条连线上的．

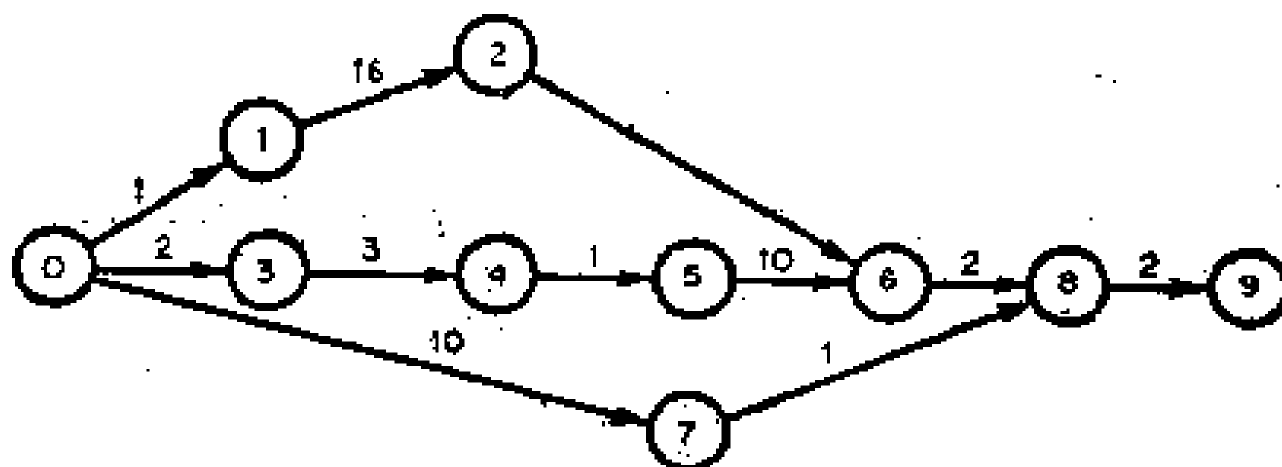


图 15.3．附有安装电动机的各项工作的时间特性的网络图

这样建立起来的网络模型，正被用来制订运筹计划和在实施过程中修订计划.

15.2. 网络分析

从网络模型中确定的一个重要指标是值 T_{ei}——出现第 i 个事件的最早时间，即从起始到这个事件的最短时间.

只有当进入网络的第 i 个节点的一切工作都已完成时，我们才认为第 i 个事件要开始了. 所以在进入该点的最后那个工作项目完成之前，这个事件是不会出现的. 如果有若干条路从初始事件通到该事件，那么该事件出现的时间，将取决于最长那条路的持续时间. 例如在图 15.3 中，0–1–2–6 和 0–3–4–5–6 这两条路都是通到事件 6 的. 这两条路的持续时间等于

$$T(0,1,2,6)=t_{0-1}+t_{1-2}+t_{2-6}=1+16+1$$
$$=18 \text{ 天},$$
$$T(0,3,4,5,6)=t_{0-3}+t_{3-4}+t_{4-5}+t_{5-6}$$
$$=2+3+1+10=16 \text{ 天}.$$

显然事件 6 不能在 18 天以前出现，$T_{e6}=18$ 天，用这一方法对每一事件，包括最终的第 k 个事件，求出各 T_{ei} 值，就可以确定完成整个工作的时间 T_k. 时间 T_k 是从初始事件通向最终事件的最长路径的持续时间. 这条路叫做关键路. 每一个网络中都至少有一条关键路. 我们这个网络中的关键路通过事件 0–1–2–6–8–9. 在图 15.4 中关键路用双线标出；它的持续时间是 $T_k=22$ 天.

关键路只出现于网络中的一部分事件和工作项目上，所以可以看出，不在关键路上的其他事件和工作项目，可以稍微迟些完成而不会影响完成整个运筹所需的时间.

对完成一部分工作时有空闲时间可以利用，以及某些事

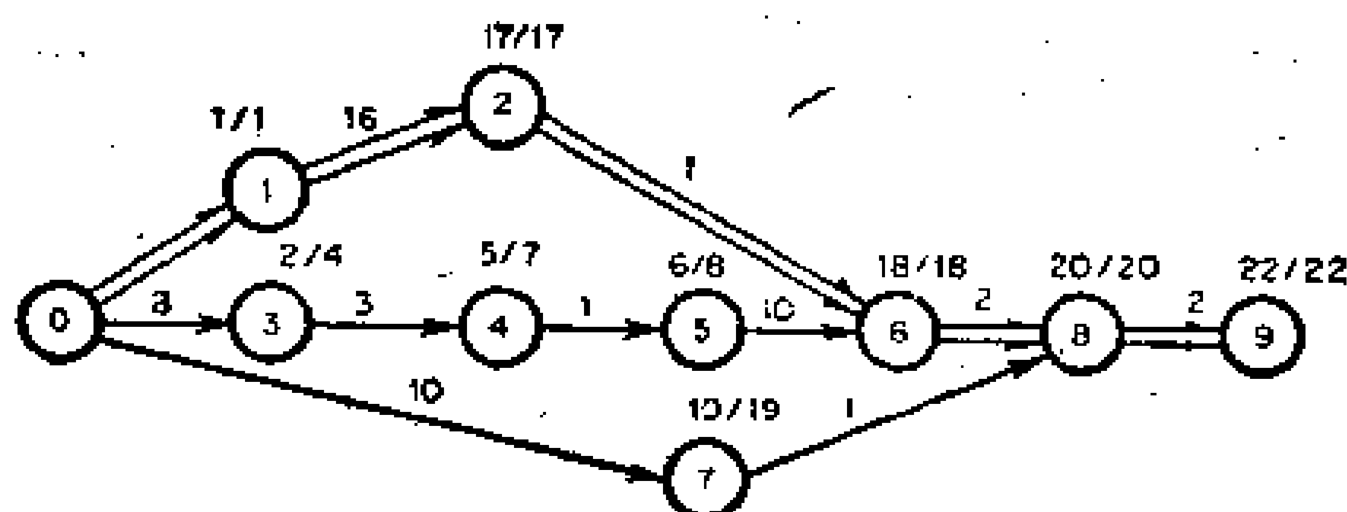


图 15.4. 本例的关键路(参看图 15.2 和图 15.3)

件的出现时间，是在制订运筹计划和控制其实施时，要加以考虑的重要因素。为了揭示可利用的时间储备，我们引进出现第 i 个事件的最迟允许时间 T_{sl} 这个概念。

从开始到第 i 个事件的最迟允许时间是，在不影响整个运筹完成时间 T_k 条件下，从开始到第 i 个事件为止所隔的最长时间。

对于任何事件来说，T_{sl} 的值都可以由 T_k——从第 i 个事件到第 k 个事件的最长路程的持续时间——推出。对于图 15.4 中所示网络的第 7 事件来说，T_{l7} 可以由下列简单的计算确定：

$$T_{l7}=T_k-T(7,8,9)=T_k-(t_{7-8}+t_{8-9})$$
$$=22-(1+2)=19\text{ 天.}$$

事件 7 的最早出现时间是 10 天，因此虽然事件 7 可以在运筹开始 10 天以后出现，但可以把它展缓到 $T_{l7}=19$ 天而不影响整个运筹的完成日期。如果事件 7 从运筹开始 19 天后出现，而工作 (7,8)需要 1 天，那么事件 8 将在运筹开始 20 天后出现，即和事件 7 更早些出现是一样的，整个运筹也能在 22 天里完成。

对于网络的每一个事件，计算 T_{si} 的值的次序和确定 T_{ei} 的值的次序相同，只有一点不同，不是从初始事件出发，而是

从最终事件出发来计算通到所考察的事件的最长路径，而且这条路径的持续时间是从 T_k 推出的. 在图 15.4 中记下了出现各个事件的最早可能时间(分子)和最迟允许时间(分母).

出现第 i 个事件的最迟允许时间与最早可能时间之差，确定了值 R_i——出现该事件的空闲时间.

$$R_i = T_{li} - T_{ei}.$$

对于关键路上的事件来说，T_l 和 T_e 的值是相同的，相应的时间储备是 0，这显然是因为最长路径的任何延长都会使它变得更长.

确定关键路和计算空闲时间，是网络分析的主要任务，每当使用网络模型来制订和修订运筹计划时，这两个问题都是必须解决的. 通常说来，一个网络要比这里所举的例子复杂得多，通常必须考虑到成百成千项事件和工作，所以关键路、储备量以及其他网络指标，常常是由计算机用专门为此编出的程序计算出来的.

15.3. 运筹计划

在大多数情况下，一项运筹的完成时刻，是达到给定运筹目标的日期. 这是因为各项工作并不是孤立的，而是由其他工作构成的链条上的环节，这些工作的目的是达到一个更高级的目标，或者构成实现该运筹的一个系统. 所以运筹计划的任务是确定实施该任务的次序，以及测出这样一些条件，在这些条件下将以所需概率在不迟于目标日期内完成任务.

因为运筹完成日期 θ_k 取决于运筹开始日期 θ_0 和执行时间 T_k，而 T_k 依赖于所用的资源，所以 θ_k 可能受到 θ_0 的日期和为完成这项运筹所消耗的资源量的影响.

如果对于给定资源来说，完成运筹的时间是 T_k，那么能保证运筹完成的起始日期由日期

$$\theta_0 = \theta_k - T_k$$

决定.

要缩短运筹的持续时间 T_0，不仅可以通过增加资源来实现，也可以通过重新分配各项工作来实现. 因为完成所有工作的时间等于关键路的持续时间，而关键路的持续时间又取决于关键路上各项工作的完成时间，所以只要缩短这些关键工作的时间就可以缩短 T_k. 为此可以把资源从有空闲时间的任务处调一些到关键路上的任务中来. 资源的这种重新分配将使 T_k 缩短，直到所有的时间储备都用尽为止. 即直到所有从初始事件通到最终事件的路都变成关键路为止.

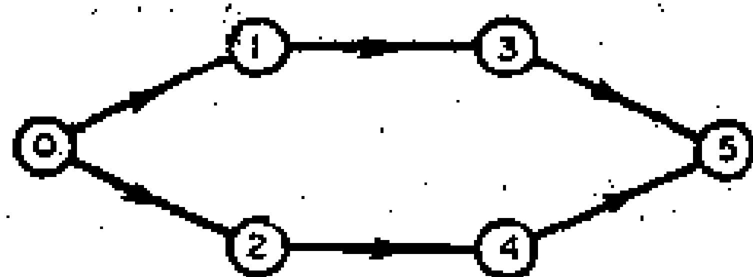


图 15.5. 工作的网络模型

所有任务都是关键任务，这一条件对于要订出一个最优计划来说，还是不充分的. 例如，我们来看图 15.5 的网络. 有关劳动量和可用于每项工作的最多人数的数据表示在表 15.1 中.

表 15.1

工作号数	劳动量(人天数)	最多允许人数
0-1	12	4
0-2	12	4
1-3	4	1
2-4	4	1
3-5	12	4
4-5	12	4

我们设完成这项运筹有 4 个人力可以使用，我们各派 2 个人去完成任务 0-1 和 0-2. 在 6 小时以后我们转而执行任务 1-3 和 2-4 (应当指出，只有 2 个人在工作). 最后，在 4 小时以后，我们各派 2 个人去执行任务 3-5 和 4-5. 在 16 小时内

这项运筹完成了，而且两条路都是关键的。但是所得到的解并不是最优解。最优的计划可以是这样的：派 4 个人去执行 0–1(3 小时)，3 个人去执行 0–2、1 个人去执行 1–3(4 小时)，然后派 3 个人去执行 3–5、1 个人去执行 2–4 (4 小时)，最后派 4 个人去执行 4–5(3 小时)。这样一来这项运筹就在 14 小时内完成了。

图 15.6 表示资源的利用图；第一种计划见图 15.6(a)，第二种 (最优) 计划见图 15.6(b)。第一种计划不是最优计划的原因是，不能用多于 1 人来从事工作 1–3 和 2–4。

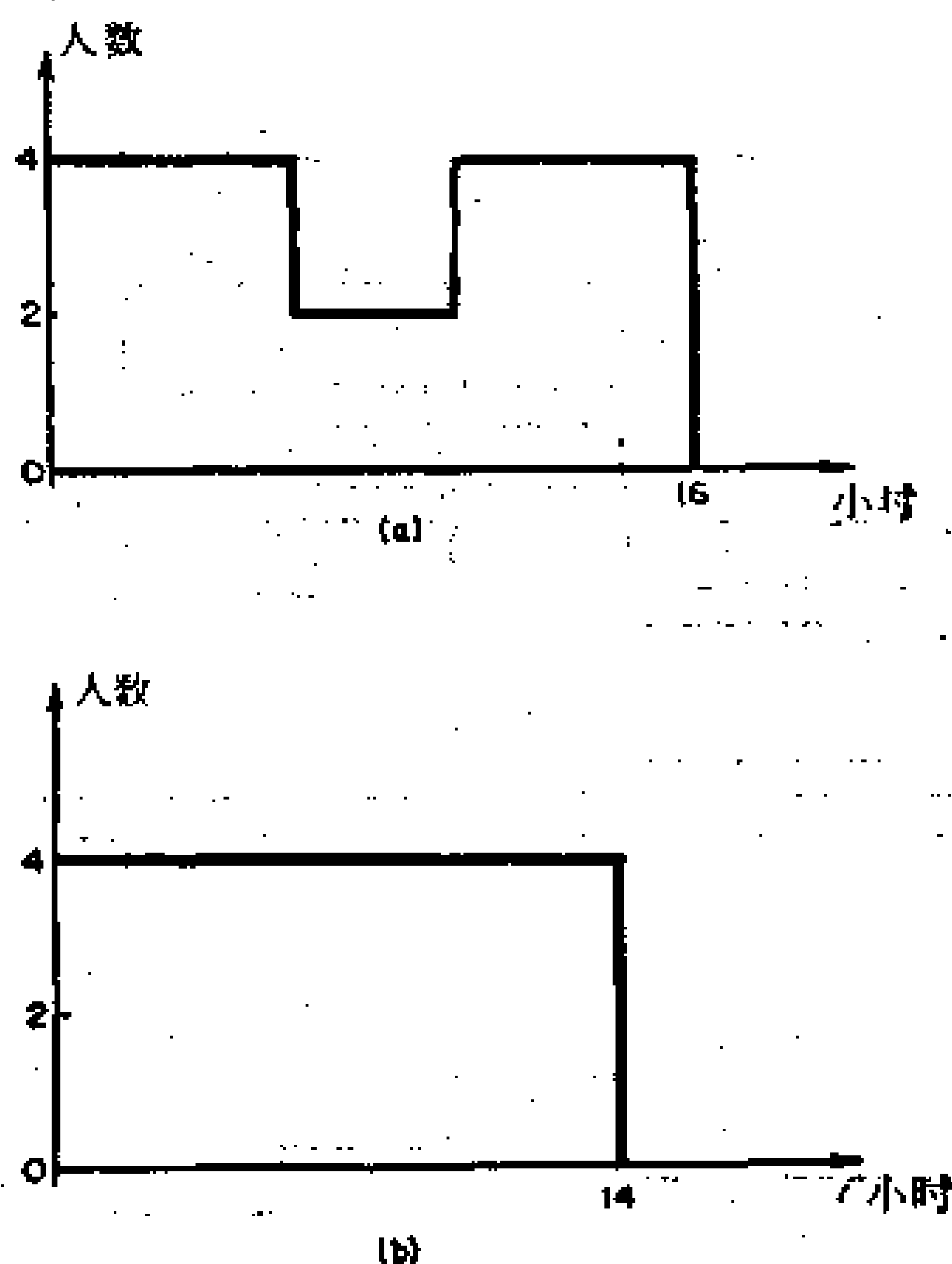


图 15.6. 资源利用图：(a) 第一种计划；(b) 第二种计划

完成运筹所用的总时间，并不总是决定着一项计划的有效性。最优性常是用不同判据来判断的，例如运筹的投资或

完成它所需要的最多人数。

让我们通过下面的简单例子来考察资源的最优分配问题。设正在建造一座配电站，现在要完成其电气安装工作。为此所需的劳动力和为网络所规定的完工时间列在表 15.2 中。

表 15.2

工作号码 1	名 称 2	工作量(人天数) 3	开始日期 4	结束日期 5
0-1	安装控制板	200	4 月 1 日	4 月20日
0-2	安装高压设备	600	4 月 1 日	4 月30日
1-3	装备控制板	200	4 月20 日	5 月10日
1-4	安装控制线路	450	4 月20 日	5 月20日
2-5	调整高压设备	300	4 月30 日	5 月30日

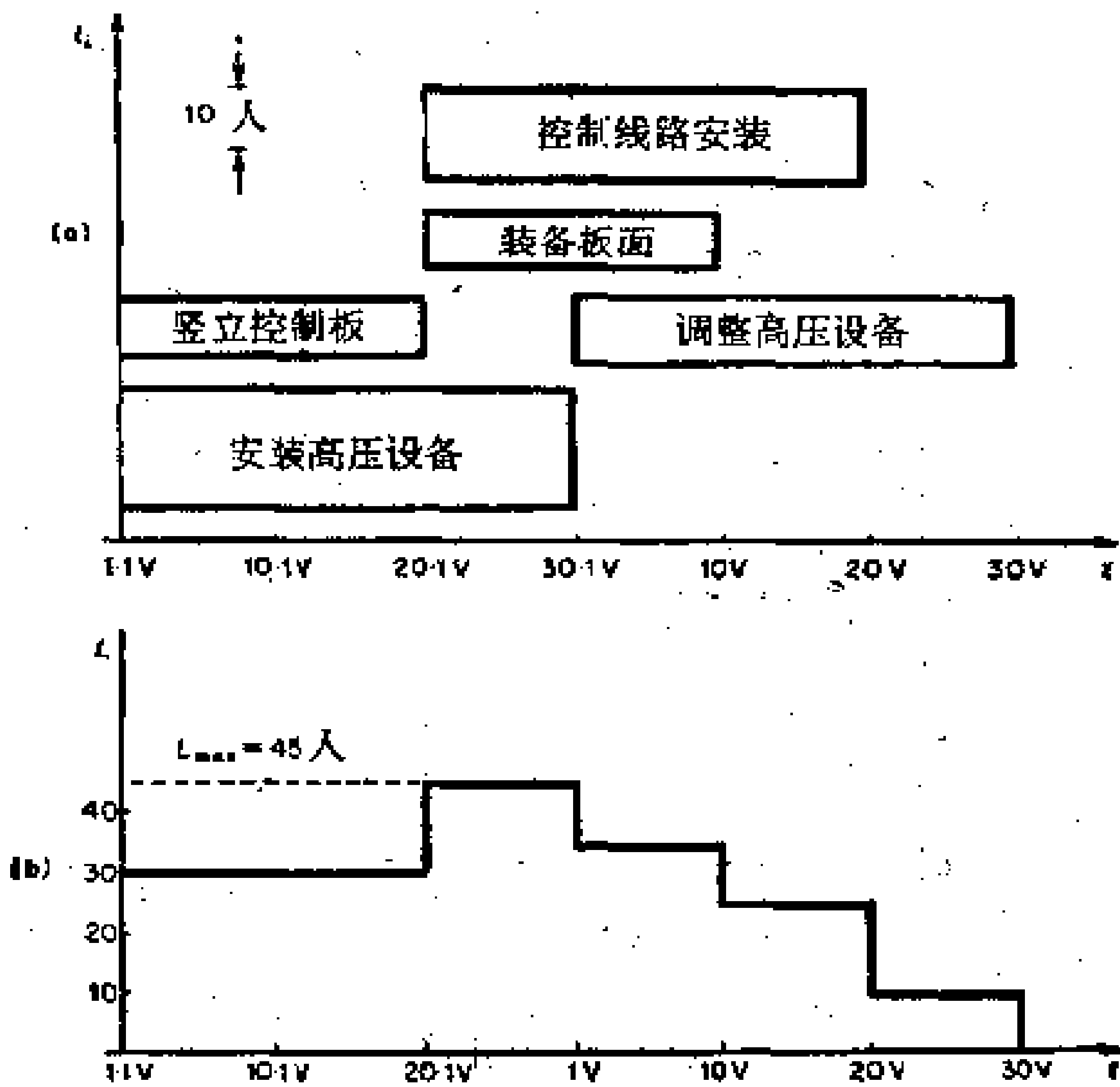


图 15.7. 资源最优分配的例子：(a) 电气安装工作序列；(b) 所需安装工的人数图

工作序列和所需安装人员数 $L(t)$ 的图如图 15.7 所示。可以看出，如果安装人员数在整个运筹期间保持不变的话，那么最多的人数 L_{max} 是 45 人。但是 L_{max} 这个数字可以大大缩减，只要详细画出图 $l_i(t)$ 来表示从事各工作的工人数，并使得对人员的总需求 $L(t)$ 更均匀就行了。对于本例来说，这样一张图如图 15.8 所示。容易看出，这时安装人员的数目 L_{max} 缩减到了 $L^*_{max}=30$ 人，这表明，资源（这里是人力）分配的最优化，在人数比原来的非最优计划所需的人数要少的情况下，能保证如期完工。

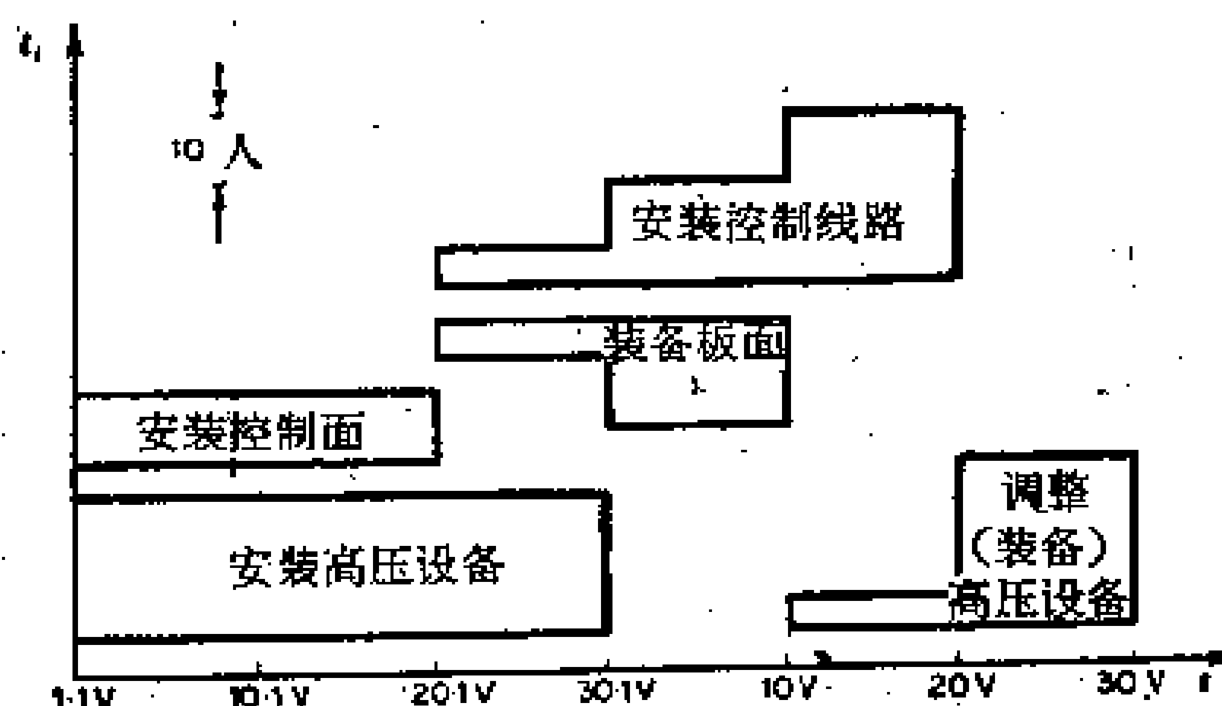


图 15.8. 安装人数的分配为最优时电气安装工作序列

15.4. 操作控制

在把运筹中各项工作付诸实施的时候，通常就会走样了，因为在订计划阶段有许多因素是没有考虑到的，例如各项工作的完成时间可能偏离计算值，可能由于操作者生病而出现延迟，物资交付发生耽搁等。常常还要干未预见到的工作，而原计划中的某些工作也可能证明是不需要的。由于这一切因素，单是拟定一份最优计划就不够了；还需要监视计划的执行并应用操作控制。

操作控制是通过改变预定的任务和重新分配资源而实现的。为此，必须随着工作的进展，周期地修订运筹计划，同时考虑到已经完成的任务、资源的实际可利用性、目标日期的可能变化。

周期地修订运筹计划的办法是：确定关键路、时间储备和资源的最优分配，为此使用在最初订计划时所用过的同样的方法，不同的是，对于已经完成的工作来说，应当把预期完成的日期换为实际完成日期，并把预期可用的资源量换为实际可利用的而且是控制工作者可以支配的资源量。

在此情况中，网络模型就不再是静态的，而是一个动态模型了，它将随着所得到的关于这个控制系统状态的数据的变化而变化。如果原来的计划表示某一应实现的程序，那么操作控制就是根据反馈来进行的，这一反馈携带着关于系统真实状态的信息，并把系统变为闭环系统。

图 15.9 用网络模型给出了一个操作控制系统的结构，可

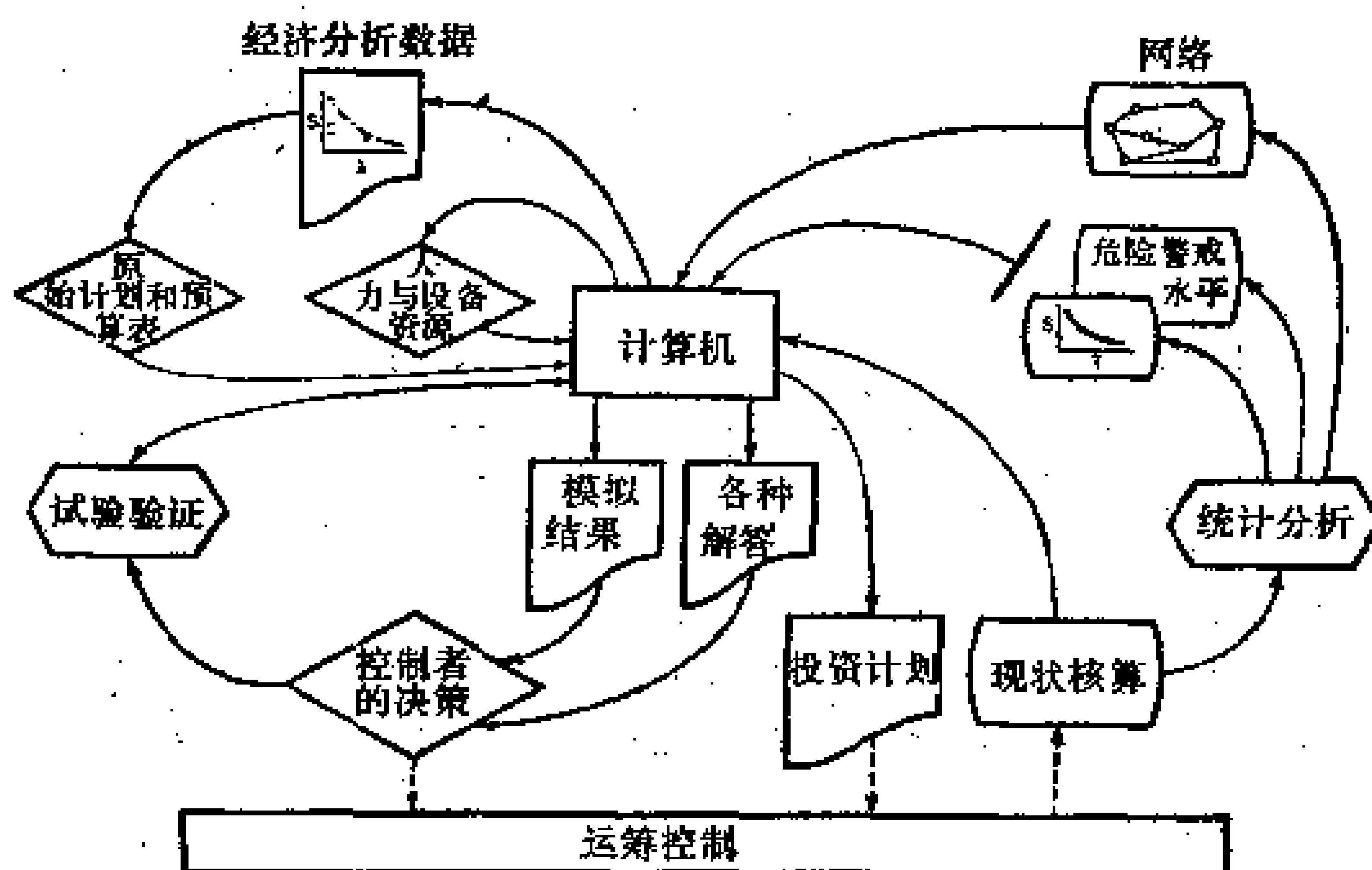


图 15.9. 网络计划系统的方框图

以看出，决策的基础是这样一些数据，它们是从计算这项运筹的网络模型的特性而得到的．计算由操作中心(工作人员)进行，或者用人工，或者用计算机，关于工作的实际状态的、可利用资源的、以及指令的数据，也被定期地送入操作中心，并作为产生各种可能解的基础，这些解正是所有工作的控制者应完成的．因为网络是所有工作的模型，所以网络有助于试探各种解会造成什么结果．利用具有各种可能解的网络，我们就能预测出，在控制者的各种可能作用下，各项工作的进一步的进展会是怎样的，并用这种方法选择最适当的解．

网络计划和控制系统，在工业、建筑、运输、科学和工程发展工作的组织控制中，正被广泛地使用着，并且还会大大改进．

练习

1. 画出含有下列算子的网络：1—2，1—3，2—3，3—4，2—4，3—5，4—5．检验一下这个网络是否含有围线．

解：见图 15.10．这个网络不含围线．

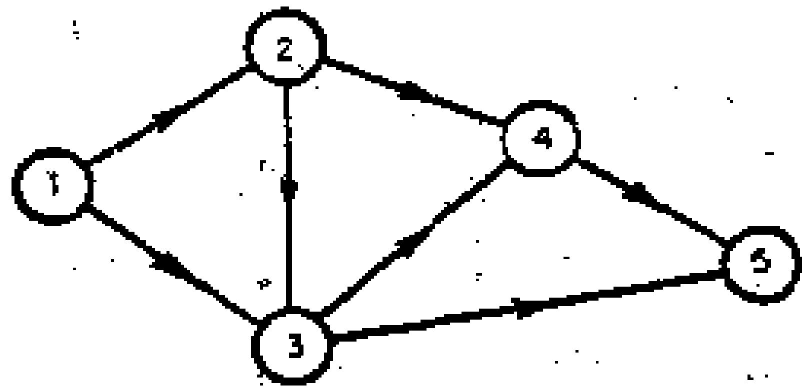


图 15.10．（第 1 题）

2. 如果在按第 1 题画出的网络中，各项工作的持续时间如表 15.3 所示，试求出每一事件的最早出现时间．

表 15.3

工　作	1—2	1—3	2—3	3—4	2—4	3—5	4—5
持续时间(天数)	5	3	1	3	2	5	2

解：见表 15.4。

表 15.4

事件号数	1	2	3	4	5
T_{ei}	0	5	6	9	11

3. 请在图 5.11 所示的网络中求出关键路。对事件 4 和 5 计算可利用的空闲时间。

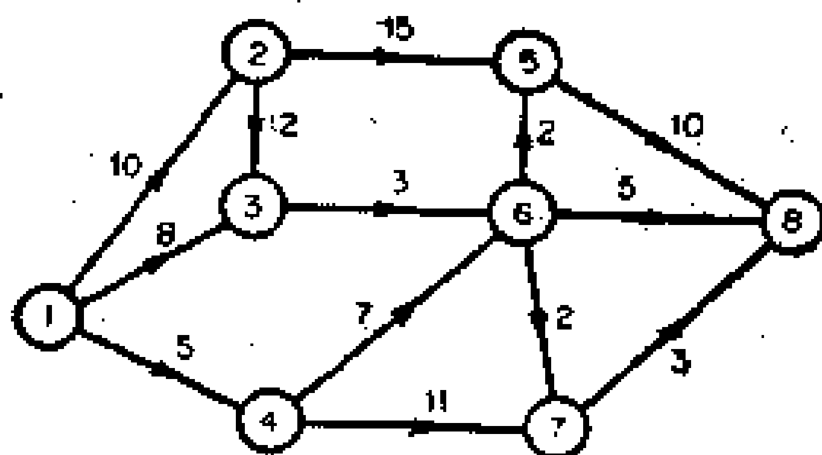


图 15.11. （第 3 题）

解：(a) 关键路通过下列事件：1—2—3—6—5—8，它的持续时间是 37 天。

(b) 事件 4 的总空闲时间是 8 天，事件 5 的总空闲时间是 0 天(因为这一事件在关键路上)。

4. 如果在图 15.11 所示的网络中

(a) 工作(运筹) 2—5 的持续时间增加到 18 天；

(b) 工作(运筹) 6—8 的持续时间减少到 3 天，

试确定执行这项运筹的持续时间是否会变化?

解：(a) 这项运筹的持续时间增加一天。

(b) 这项运筹的持续时间不变。

5. 如果在图 15.8 所示的工作集合中，安装工作可利用的劳力增加到 600 人天、调整高压设备工作所用的劳力降低到 125 人天，试求出最优的资源分配。

确定均匀地把人员用于各项工作的图与最优图所需人员

之差。

解：在均匀图的情况下，各项工作的操作者要 60 人；在使用最优图的情况下要 32 人。相差 28 人。图 15.12 给出了一个可能的解。

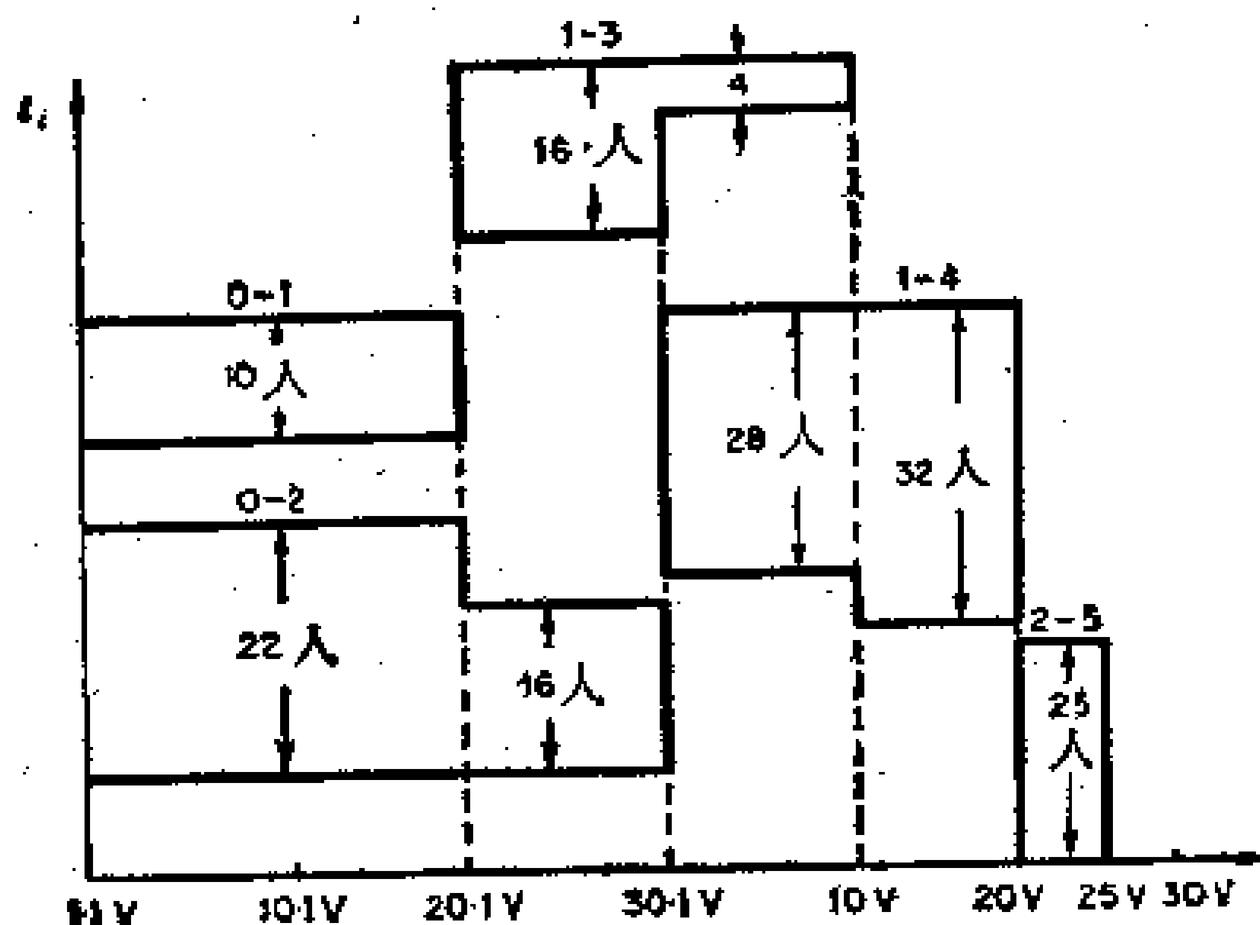


图 15.12. （第 5 题）

第十六章　脑

许多世纪以来，动物界中确保生命绵延的控制系统的高超性能，一直吸引着科学家们的注意．在活机体中的控制作用，是自然界最严加保守的秘密，科学至今还很少刺探出什么来．活机体中的控制问题，正在由科学的各个学科的代表人物从多方面进行研究．为了探讨这种控制系统的结构，生理学家和心理学家立足于研究机体的行为，组织学家则立足于阐明细胞结构；生物物理学家和生物化学家研究的，则是构成生物系统控制基础的各种物理和化学过程．控制论也致力于研究活机体中的控制系统、控制论的任务是用控制理论中一般关系的术语来了解和再现活的控制机构的特征．

每个活机体的出生、发育和活动，都受到形形色色的控制系统的控制，这些控制系统解决问题的方式是不同的，用来求解的方法也是不同的．在细胞不断分裂而还能保证其功能的情况下，如果没有一个控制系统来重建细胞结构，各个细胞的生命就无法想象了．为了控制体内过程，使机体内的某些重要量不超出容许界限，就必须有一个保证体内平衡的复杂而高度有效的系统．生物体对变化着的环境的适应，也需要有非常优良的控制机构不断参与这一活动．

在各种活机体中，为了在各器官间交换信息并把控制信号从控制中心传输到运动器官，所用的方法可以大不相同．已经知道，执行这些功能的是**激素系统**．激素是某些器官(例如甲状腺)产生的特殊化学物质，而激素系统是这样一种系统，它用激素作用于其他器官，从而调节这些器官的功能．通过

神经系统中的信号循环，传输着信息和控制指令，此外神经系统还要负责存储信息和对信息进行复杂的加工，正是这些信息保证了机体的生活能力和有目的的行为。在这一章中我们要介绍关于神经系统所实现的控制过程的基本知识。

16.1. 神经元

神经系统由被称为神经细胞的单个细胞所组成。我们把各种类型的神经细胞总称为神经元。神经元是一种特化的细胞，它具有可被激励并能沿某一方向传导信号的性质。图16.1是神经元的模式图，神经元由三部分组成：细胞体，它含有细胞核和细胞质，并由一外皮包裹，叫做膜；从膜伸出一些

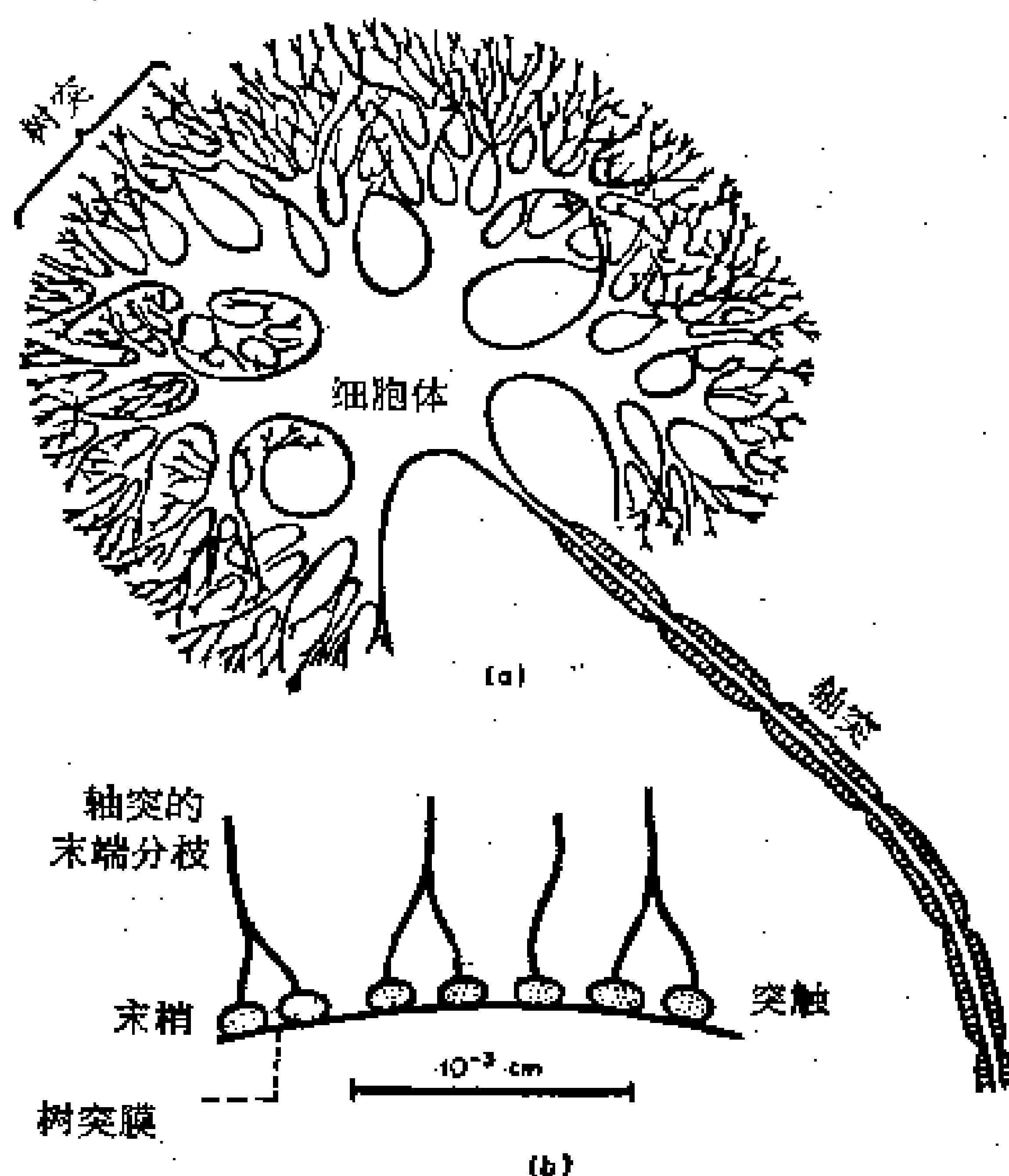


图 16.1. 神经元的模式图：(a) 细胞体；(b) 轴突末端

分支体，叫树突；还有一条轴向延伸体，叫轴突．轴突的末端分支通过突触和其他细胞接触．轴突还分出别的分支，叫侧支，侧支也和其他细胞接触．

神经元有三种类型：感觉神经元、运动神经元和联络神经元。

神经信号作用在突触上，从而使神经元受到激励，这种信号可以使神经元兴奋，也可以使神经元抑制．

一个神经元有一百个到一千个突触．神经元膜的状态（它的电位）取决于馈给突触的信号的大小和持续时间．当膜电位达到某一阈值（约 $40mV$）时，就出现一个神经冲动——活动波，它沿着轴突的神经纤维传播．沿神经纤维传输的这个激励代表一个电化学过程；激励的传播速度取决于纤维的直径而在 1—150 米/秒之间变化．神经纤维传播了冲动以后，在一定时间内（所谓不应期）处于完全不可激励的状态，也就是说，不管激励多么强烈，该神经纤维也不传导神经信号．

神经元的一个特征是，它所产生的信号总是大小一样的．在神经纤维中的信号，或者等于零，或者有最大值．换句话说，这种信号是使用二进制码——"全或无"——通过神经细胞的．

从控制论观点看来，并不是所有神经元的性质和特征都是重要的，只有其中那几个与得到、加工和传输信息的功能情况有关的，才是重要的．所以与神经系统中的信息过程有关的一些重要关系，可以用非常粗糙的神经元模型来说明．

美国科学家 W. S. 麦卡洛克（McCulloch）和 W. 皮茨（Pitts）提出了一种神经元的逻辑模型，这种模型已被证明是非常有用的．这个模型表示一个以二进制码来操作的、具有一个输出的多输入的阈装置．作用在这种形式神经元上的各个输入作用可以是 +1 或 −1．如果作用之和超过阈值，那

么神经元就兴奋起来，在它的输出处也就出现一个信号.

这种神经元实现着某种逻辑函数，见第九章. 这种逻辑函数把模型的输出与输入处的信号联系起来，函数的类型取决于各类输入的个数、它们的联结和反应阈值的大小.

可以把神经元的形式模型连接在网络线路的各级之间，这一线路具有活机体的神经系统的某些性质. 除了形式的神经模型之外，现在还产生了其他神经模型，它们在一定程度上接近于活的神经元的性质. 这些模型还可以表示神经元的这样一些特性，象信号的空-时积累、不应期（不可激励时间）、适应性（对激励的性质的适应）和自发兴奋性. 这些模型使我们能够作出关于神经元的功能的假设. 但是不管模型的行为多么接近于神经元的行为，还是不允许从神经元模型的结构得出关于神经元本身结构的结论. 这是因为，从对输入值所作的输出反应，来判断一个"黑盒"的内部结构，在原理上是不可能的，这一点在第三章中已指出过了.

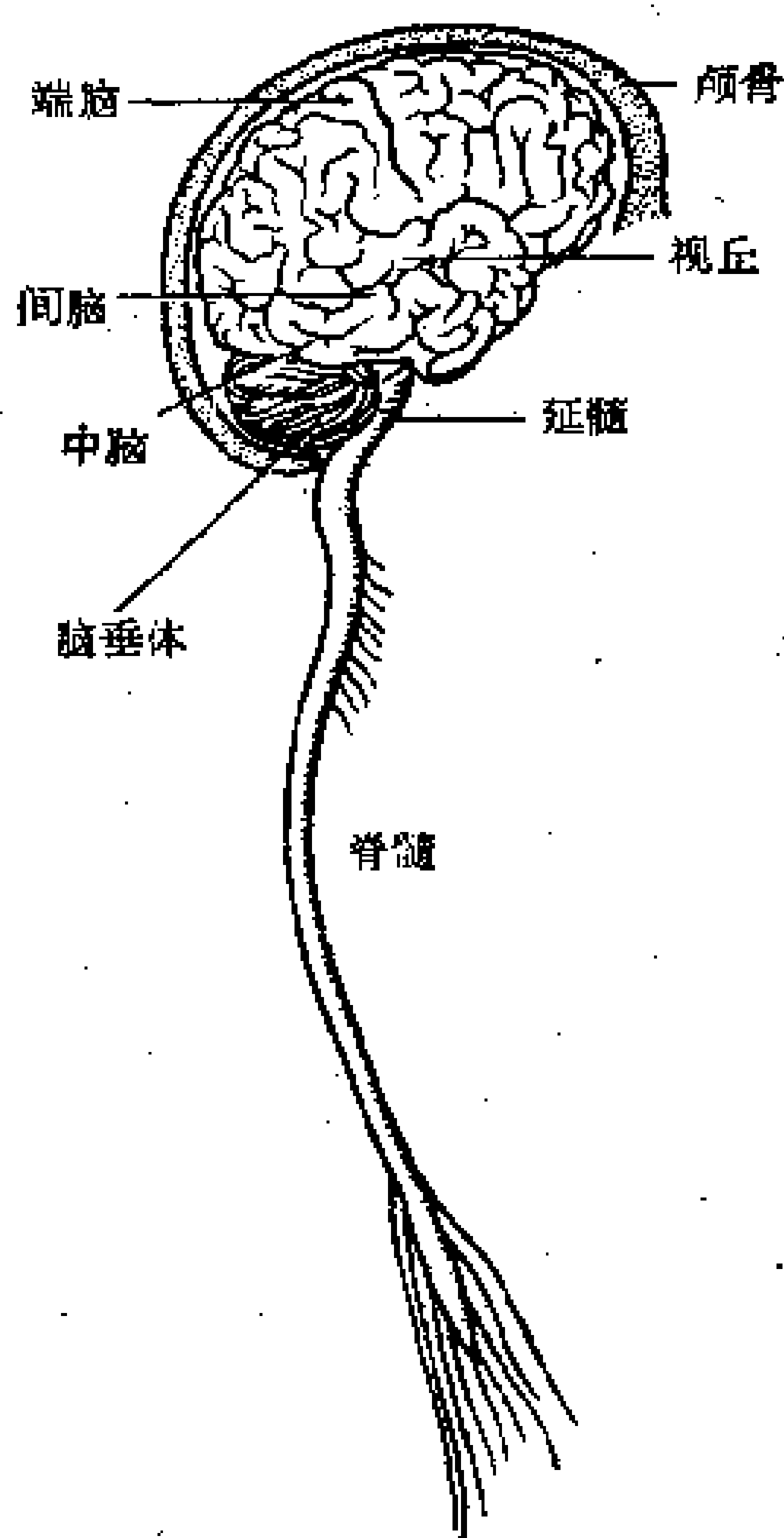


图 16.2. 人的中枢神经系统略图

16.2. 神经系统

人的中枢神经系统（图 16.2）是由脑和脊髓组成的，所有脊椎动物都是这样. 脑有下列主要部分：（1）延髓；（2）

小脑；(3) 中脑；(4) 纹状体；(5) 大脑. 中枢神经系统从感觉元件(感受器)接收信号，再借助于构成周围神经系统的神经纤维网络，把信号传输到运动元件(效应器). 神经系统的各部分以及作为整体的神经系统，都是由通过突触彼此连接的神经元构成的. 突触把一个神经元的轴突和另一个神经元的细胞体连接起来. 组成人的神经系统的神经元估计有 10^{11} 个，其中约有一半是在纹状体内. 前脑的神经细胞体主要集中在它的表层(大脑皮层)内，那里显然是负责脑的有意识活动的主要中心.

由神经系统所组成的信息链的结构，起着保证身体控制的作用，在图 16.3 上给出了它的一个易了解的、虽然是粗糙

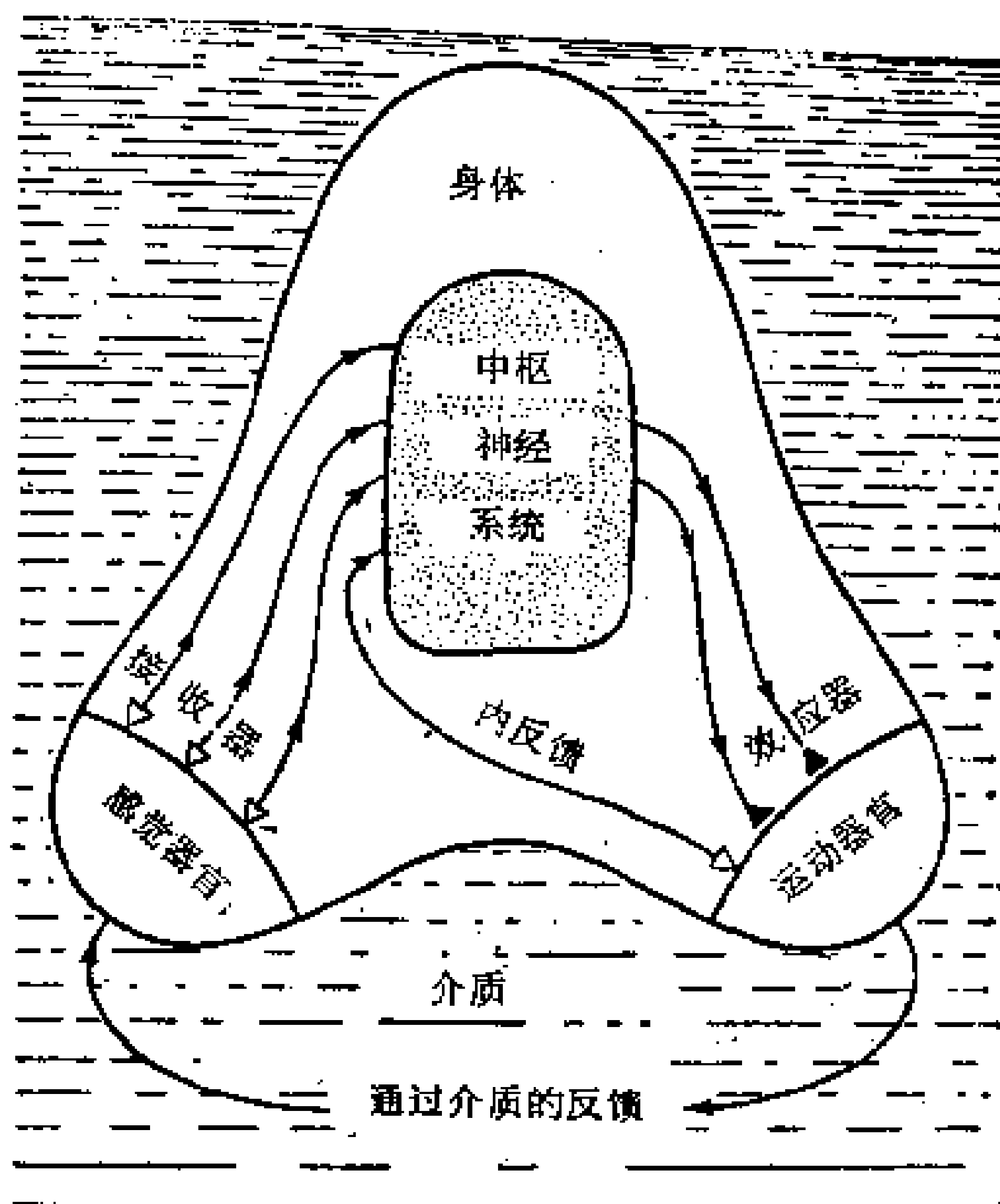


图 16.3. 神经系统所引起的信息链的结构

和原始的概念．对外界介质的资料由感觉器官收集起来，传输到感受器，然后沿神经纤维传输到周围神经系统，再通到中枢神经系统的适当部分．在这里所得到的信息经过加工和鉴定，与所存储的信息比较，如果必要的话就形成命令，沿神经纤维传输到效应器而对运动器官（肌肉、腺体）起作用．运动器官的活动是由反馈监视的：内部反馈检验运动器官动作的强度，外部反馈检验执行命令的最终效果．

可以看出，上面所描写的这个系统的结构，和第七章中所考察的自动控制系统的结构有许多共同的性质．

信息是借助于适当的感受器和效应器收集的．送出的命令不仅涉及机体与介质间的相互作用，还保证着内部器官和系统的正常功能．

麦卡洛克和皮茨以神经网络形式提出了一个简化模型，它是由一堆互相连接的神经元组成的，这个模型使我们能用形式方法来研究神经系统．每个神经网络都由输入神经元、中间神经元和输出神经元组成．同无限自动机中的过程一样（见第九章），这种网络中的过程也可以看作是在离散时刻 $t=1, 2, \cdots$ 上发生的．每个输入神经元的状态，不管是兴奋的还是抑制的，都取决于和它相邻接的知觉器官对介质状态的反应．神经系统的每个中间神经元和输出神经元在时刻 t 的状态，都取决于它和输入在前一时刻 $t-1$ 的状态．如果兴奋性输入（突触）中至少有 h 个在前一时刻是兴奋的，而任何一个抑制性输入都未被兴奋，这时神经元就会兴奋．值 h 叫做这一神经元的阈值．

神经网络的简单例子如图 16.4 所示．这里 X_i，Y，Z 分别表示输入状态、输出状态、中间神经元状态；兴奋性突触用黑点表示，抑制性突触用圆圈表示；三角形代表神经元，三角形中的数字量所代表的神经元的阈值．

图 16.4(a) 所示的网络实现合取运算，因为这个逻辑函数确定一阈值为 $h=3$ 的输出神经元的兴奋条件，同时可以把这个运算写成：

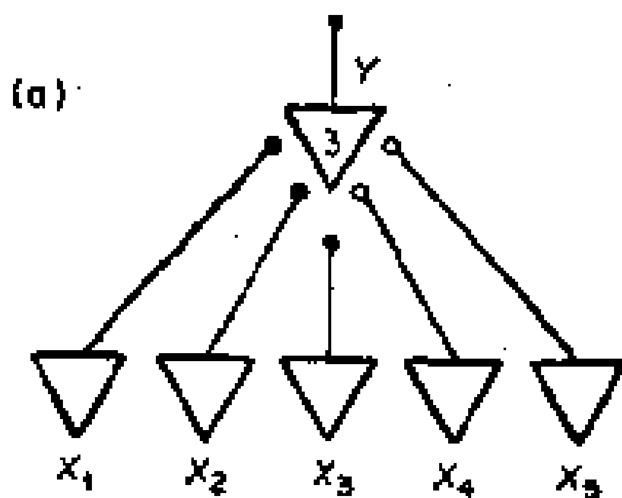
$$Y(t)=X_1(t-1)\&X_2(t-1)\&X_3(t-1)\&\overline{X}_4(t-1)\&\overline{X}_5(t-1). \quad (16.1)$$

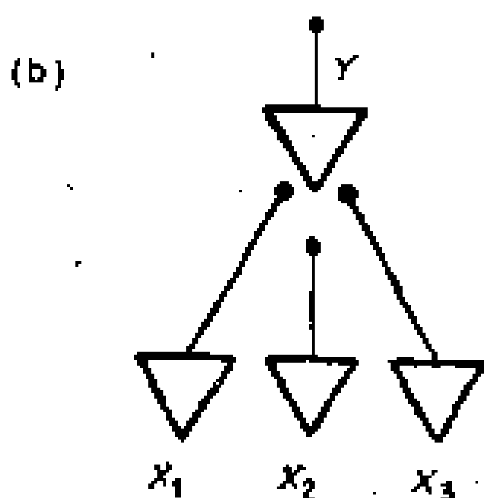
容易看出，如果阈值改变了，例如 $h=2$，那么由网络 16.4(a) 实现的那个函数可以表达为

$$Y(t)=\{[X_1(t-1)\&X_2(t-1)]\vee[X_1(t-1)\&X_3(t-1)]\vee[X_2(t-1)\&X_3(t-1)]\}\&\overline{X}_4(t-1)\&\overline{X}_5(t-1). \quad (16.2)$$

当阈值 $h=1$ 时，逻辑加(析取）运算是由图 16.4(b) 中所示的那个网络实现的：

$$Y(t)=X_1(t-1)\vee X_2(t-1)\vee X_3(t-1). \quad (16.3)$$





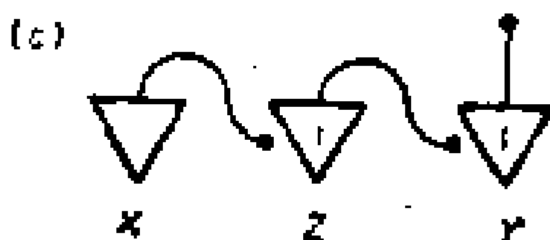


图 16.4. 神经网络的简单原理：
(a) 表示合取运算的网络；
(b) 表示析取运算的网络；
(c) 表示延迟两个时刻的网络

k 个时刻的延迟是由这样一个网络实现的，这个网络由一个输入神经元、一个阈值 $h=1$ 的输出神经元和 $k-1$ 个中间神经元组成．延迟两个时刻的网络如图 16.4(c) 所示．

$$Y(t)=Z(t-1),$$
$$Z(t)=X(t-1),$$

所以

$$Y(t)=X(t-2).$$

如果神经网络是含有环（反馈）的，那么它在任何时刻的

状态都取决于初态，即取决于这个网络形成时刻的状态．例如在图 16.5(a) 中所示的网络具有下列性质．如果在初始时刻 ($t=1$) 神经元 X 或 Z 兴奋，那么神经元 Z 在此后所有时期内都将一直处于兴奋状态，因为 Z 在第 i 个时刻的那个环的兴奋作用将使 Z 在第 $i+1$ 时刻兴奋．如果在初始时刻和所考察时刻间的任何时刻输入神经元至少兴奋一次，那么也会观察到 Z 的兴奋状态．

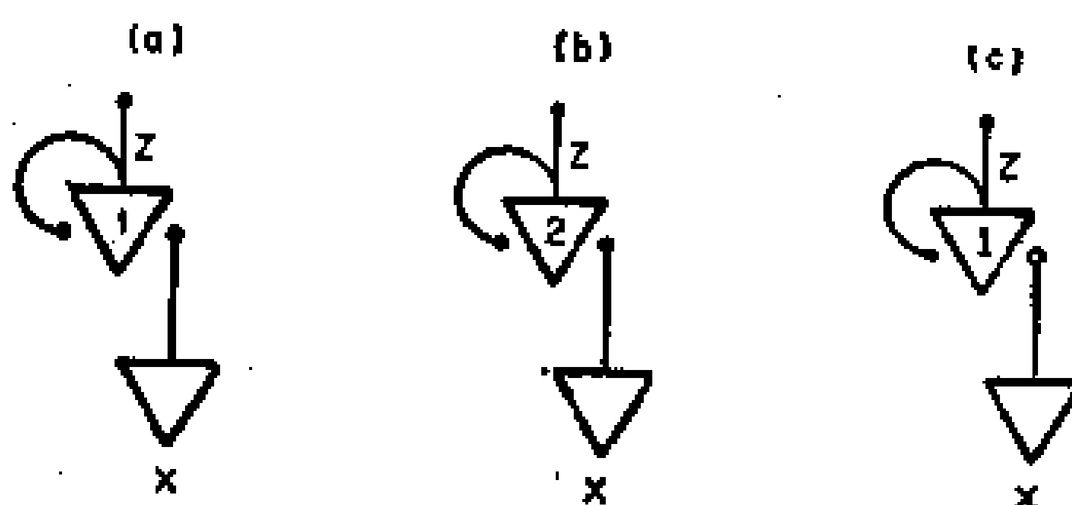


图 16.5． 含环神经网络的例子

在图 16.5(b) 中所示的网络里，只要神经元 Z 在初始时刻兴奋，且神经元 X 从初始时刻到所考察时刻一直保持兴奋，那么 Z 在所考察时刻之后的一个时刻就会兴奋．

与图 16.5(a) 中所示的网络不同，在图 16.5(c) 中所示的网络里，连接 X 和 Z 的突触都是抑制性的．在这种网络里，仅当 Z 在初始时刻兴奋但神经元 X 一次都没有兴奋过时才会出现 Z 的兴奋状态．

含环网络在原理上不同于不含环的网络，因为前者能长期记忆某些事件（神经元在一定时刻的状态），而不含环的网络能保存事件痕迹的时刻的数目，不大于包含在该神经网络中的、最长的那条串联的神经元链中的突触数．

和初态相比，在图 16.5(a) 和 (c) 中所示的网络里，Z 的状态由于下列事实才会改变：在这个网络的"历史"上某一时

刻出现了一个事件——输入神经元兴奋了，而且只要网络还存在，Z 的这一状态就“永远”保存下去。图 16.5(b) 中的网络是能够“记忆”的。从建立网络的时刻起，输入神经元就无例外地总是处于兴奋状态。

至今我们一直假设，所有的神经元以及它们的内部联结是无误地工作的，显然这个假设是不现实的。正如有限自动机这样的人工装置一样，活的神经网络受到各种因素的作用，这些因素可能引起功能失误，即产生不符合联结的原始结构和各元件阈值的动作。因此假设网络的每个元件都有某个 $\varepsilon > 0$ 的功能失误概率就比较现实些。不管 ε 的值多么小，都必须承认下列事实：错误可能大大地改变神经网络的性质。关于系统性质中会出现功能失误的假定所带来巨大变化，作为一个例子，我们来看图 16.5(a) 中所示的长期记忆器官——含有一个环的神经元。在功能不失误的情况下，这样一个器官一旦兴奋就将永远兴奋下去。

现在设这个器官可能犯一个错误的概率为 ε。如果我们考察从这个器官兴奋后的第 S 个时刻之后的状态，并选择 $S \gg \frac{1}{\varepsilon}$，那么很清楚，在这段时间里这个器官可能犯一个错误的概率接近于 1，其结果器官将失去兴奋或可能自发地兴奋起来。

所以不能根据这个器官在所考察时刻的状态，去断定它在充分远的过去的状态一定如何。如果网络含有大批互相连接的元件，又如果其中一个元件或几个元件中的错误会导致整个系统中出现错误，那么这个线路的功能失误概率就会上升，而且即使对于很小的 ε 值，功能失误也将变得非常可观。

在这些条件下，既然神经系统含有几十亿个神经元，这些神经元又显然不会有无限高的可靠性，那么就不可理解为什

么神经系统能可靠而稳定地工作许多年了。但是人们已经发现，具有下列性质的线路的结构是存在的，这种线路要比它的组成部分更可靠。美国科学家J. 冯·诺伊曼提出并证实了一些增加可靠性的方法，一种方法是用**复线**。网络中的每个信号都传输到N条线的线束上去。取某一置信水平$\delta(0<\delta<0.5)$，我们就可以认为：如果有多于$(1-\delta)N$条线处于兴奋状态，就确实有一个信号存在；如果处于兴奋状态的线少于δN条，则不存在什么信号；如果有δN条到$(1-\delta)N$条线兴奋，状态就不确定。

具有上述线束的系统，必具有一种叫做**混合器**的元件（图16.6），混合器实现下列函数：

$$Y(t+1)=[X_1(t)\&X_2(t)]\vee[X_2(t)\&X_3(t)]\vee[X_1(t)\&X_3(t)] \quad (16.5)$$

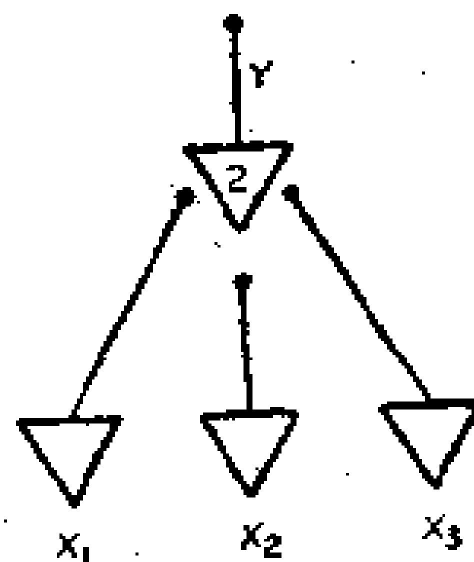


图 16.6. 混合器

即这一器官对"多数票"起反应；如果在前一循环它的三个输入中至少有两个处于兴奋状态，则这一器官就兴奋。

用复线来提高网络可靠性的原理，可以清楚地从图16.7所示的线路中看出来，这个线路是用来实现逻辑函数$Y=R(X_1,X_2,X_3)$的。这里各线束中有$N=4$条线，而混合器C则用来恢复信号。我们取$\delta=0.25$作为置信水平，这意味着，如果这束线中处于兴奋状态的线不超过$\frac{1}{4}$（即不多于1条），我们就认为没有信号，如果处于兴奋状态的线不少于$(1-\delta)N=3$条，我们就认为有一个信号。从图16.7中可以看出，如果从线路R发出的一束线中（重复四次），由于犯错误而有一条线兴奋了，那么在混合器的输出处是不会产生兴奋状态的。但是，如

果对信号“1”来说，在从R发出的线束中有一条线被判明是处于不兴奋的状态，那么这也不会使处于兴奋状态的混合器的输出中止。但是当线束中有两条线兴奋时，这个线路就不会增加(改善)确定性了。

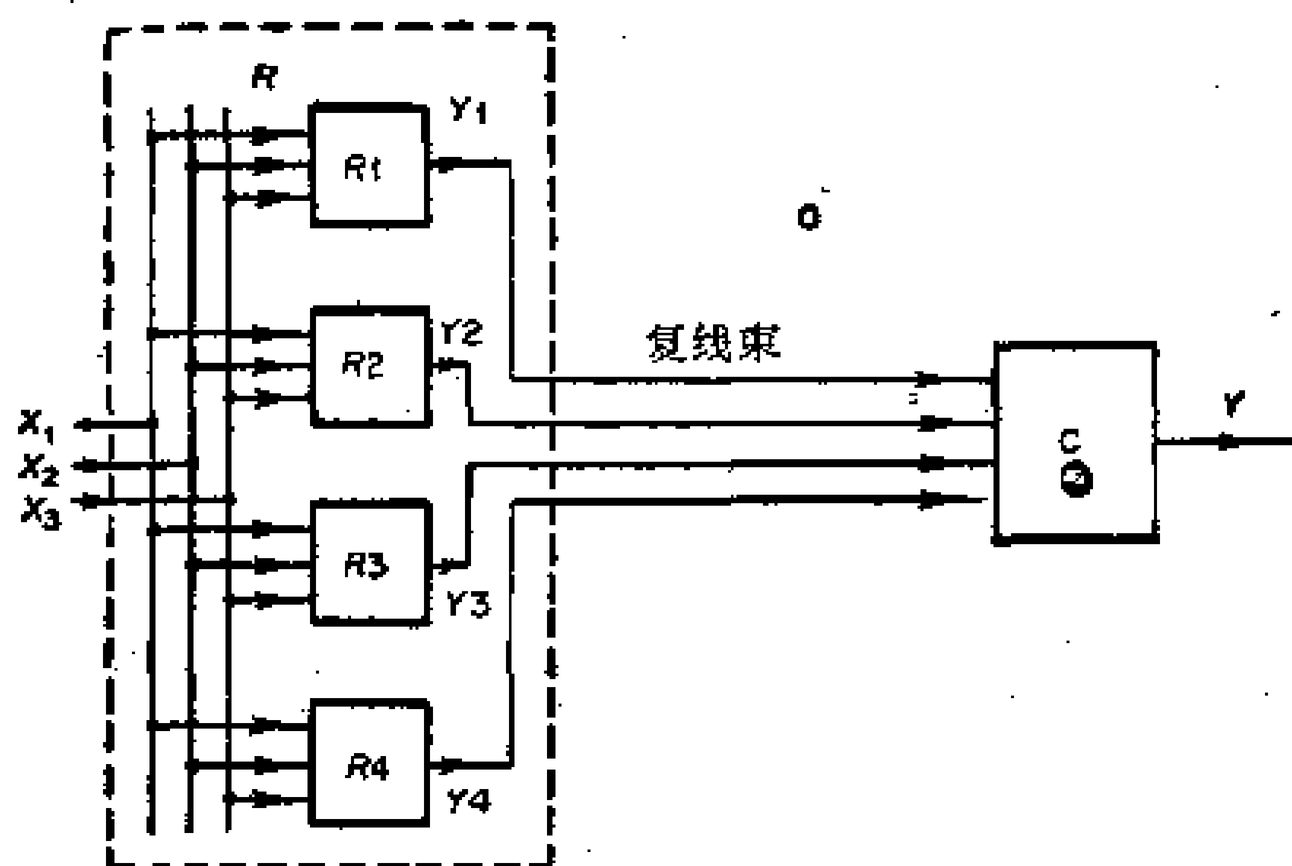


图 16.7. 用复线来改善网络的可靠性

在动物和人的神经系统中，很可能有一群神经元能作为再生器官而起作用，并保证复杂的神经结构可靠地工作。

神经网络的上述性质指出，在下述意义上神经网络和有限自动机是等价的，即对于任何神经网络来说，都可以选出这样一台自动机，它的行为(对一系列输入信号的反应)和该神经网络的行为相仿。用形式神经元构成的神经网络，有些性质是同动物和人类神经系统的性质相类似的。这种神经网络能够模拟调节器的功能、反射和条件反射机制，以及某些由神经病引起的变态。但是不能就此说，有限自动机等价于活的神经系统，而且脑的任何功能都能由有限自动机模拟出来；麦卡洛克-皮茨神经网络只是脑子这样一个非常复杂的系统的一个简化模型，虽然显然不能说反过来也是对的，即脑子可以

模拟麦卡洛克-皮茨神经网络。

16.3. 知觉器

麦卡洛克-皮茨神经网络是神经系统的一个确定型模型，即一个具有固定的联接结构和阈值的模型。这种模型相当于一种把脑看作是专用计算机的脑的概念。虽然用这种模型得到了有用的科学结果，但它也造成不少困难，主要有：

（a）神经网络能解出的问题种类，要比含有同样多神经元的活脑的潜在能力要狭窄得多。

（b）麦卡洛克-皮茨神经网络的连接中稍有一点扰乱，就会剥夺这一系统正确完成其功能的可能性，而实际的脑子，即使受了很大的损伤，还能执行复杂的任务。这些困难在一定程度上可用脑的随机（概率）模型来克服。

要复制脑的某些功能，一种最有趣的、最有成果的模型，就是所谓知觉器。

知觉器是这样一类模型，它们的特征是具有一个存储器，而各单独元件间的连接具有随机结构。经典的知觉器（图16.8）由三种阈元件组成：

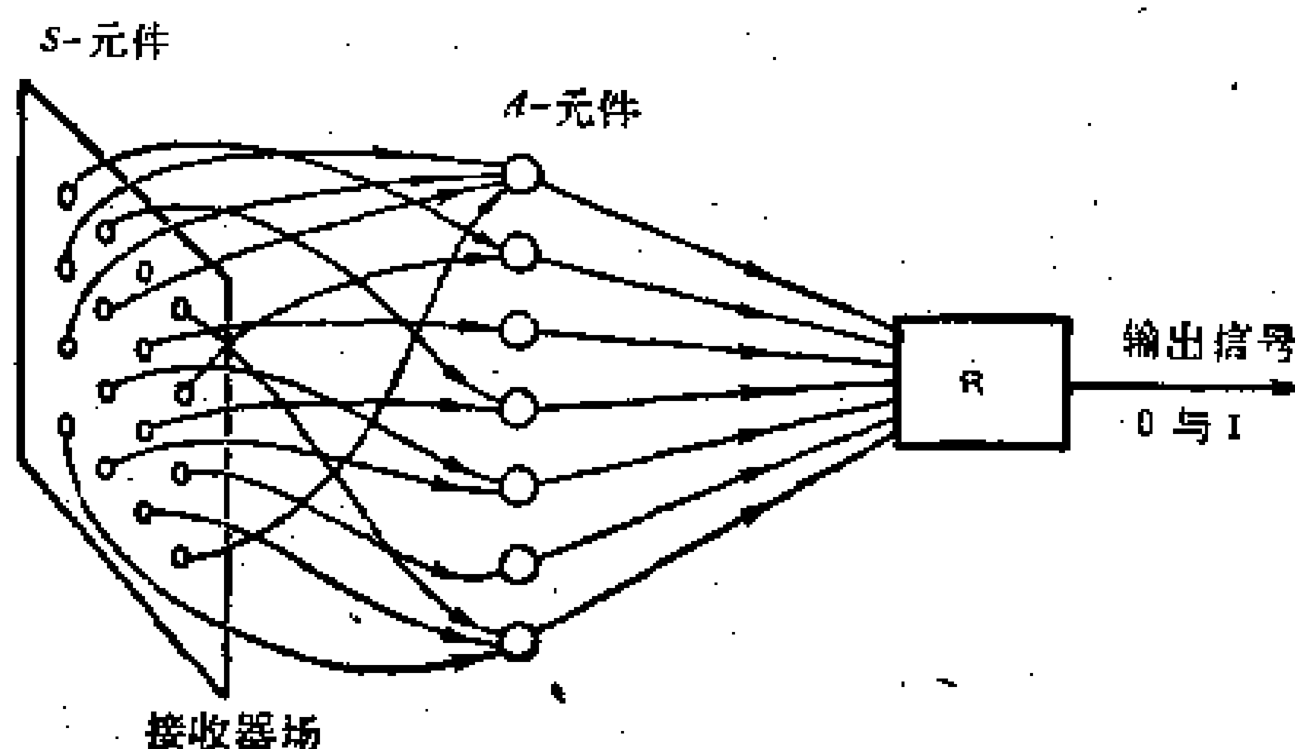


图 16.8. 简单知觉器的图

(1) S 元件——接收器，它们以类似于活体的感觉器官的方式，接收关于外界条件的信息；

(2) A 元件——组合元件，它们接收某些 S 元件的每一个信号；

(3) R 元件——在 A 元件的作用下形成输出信号。

A 元件和 R 元件间的连接是可变的，这样一来，在激励信号的影响下，它们对 R 元件的作用的程度可能增加。

我们设知觉器的（S 元件的）接收器场收到一个输入。又设 R 元件以某种方式对所发生的事情作出反应，这种反应在某种意义上为正或为负，在正反应的情况下产生一个激励信号。那么在知觉器中的"有用"连接将逐步强化，从而增加知觉器对接收器场所知觉的情况作正反应的频率。这样一来，一系列的激励就能教会知觉器去显示出加给它的某种行为，不管在学习过程开始时的连接是多么强，也不管它的 S 元件与 A 元件以及 A 元件与 R 元件的连接线路是具有随机性质的。

已经阐明，知觉行为的特征，象任何别的学习机的行为的特征一样，是在一系列激励的影响下建立起来的，并且取决于被我们看作是好的（正的）那种反应。如果激励信号来自人，"教师"，那么知觉器的行为将逐步达到"教师"所要求于它的行为。如果激励的来源是把知觉器的反应和同样情况下任何别的系统的反应的比较结果，那么知觉器就将模仿那个系统的行为。没有系统化的激励，知觉器的行为里就不存在有目的的变化。

知觉器是第一个能学习识别图形的自动机（见第十三章）。但是，如果把知觉器的结构做得足够复杂的话，知觉器型的自动机还能解决许多别的问题，包括由活脑解决的问题。它们将不仅能学会将接收器所感知的外界介质的情况加以识

别和分类，而且还能对情况作出估价并归纳出概念来．因此知觉器具有知觉的性质，虽然只是以很原始的形式，所以若要模拟脑的某些智力功能，则知觉器是有吸引力的，也是有效的．显然，知觉器和脑之间的相似性，纯粹是功能上的，而不能应用到它们的结构和工作机制上去．

16.4. 思考

尽管目前已经研究了脑子里的许多过程，但是仍然不清楚象思想、幻想、记忆之类的认识现象的本质是什么，而日常经验却证明，这些现象是存在的，而且许多人都已形成了关于这些现象的直观概念． 在实现机体的这种智力活动时，神经系统，特别是脑，所起的某些作用，这一点已为很多研究所肯定．

第 16.2 节介绍了关于由形式神经元组成的神经网络的知识，从中可以看出，尽管事实上组成神经网络的神经元的性质非常简单，但这种网络却具有各式各样的性质和复杂的行为．可以有根据地说，脑子之所以拥有巨大的智能潜力，并不是因为单个的神经元有什么特别的性质，而是由几十亿脑神经细胞组成的复杂结构所决定的．

对地球上活机体发展过程中脑的进化的研究，对于脑为保证活机体生存所发挥的功能和作用的解释，导致结论说，为了维持生存，通过使身体对随时间而变化的介质的适应，脑就作为一个特化器官而发展起来了．

但是，如果没有关于环境的信息，适应将是不可能的．所以脑作为保证适应行为的器官，其功能主要在于，对所得到的、关于机体周围条件的和在这些条件下机体状态的信息，进行加工． 这样一来，就可以把脑看作一个非常复杂的控制论系统，它在加工所得到的信息的基础上，实行对机体的控制．

脑的内部结构复杂之极，这使我们很难对它作详细的研究，这样使用"黑盒"方法就成为很吸引人的了。研究动物和人的较高级的神经活动的所有生理学技术，基本上都是以"黑盒"原理为基础的。

И. П. 巴甫洛夫（Павлов）及其学派，立足于客观地评价动物对各种复杂刺激的反应，从而为这一科学分支奠定了基础。通过他们的研究，已经发现了支配脑的活动的某些重要关系。巴甫洛夫所做工作的一个重要结果是，他发展了一种产生和消除条件反射的实验技术。无条件反射是动物以一定方式对外部刺激起反应的本能。和无条件反射相反，条件反射是动物对条件刺激的反应。所谓条件刺激是指这样一种刺激，它与无条件刺激相结合而间接地产生某一种应答反应。

在巴甫洛夫对狗的经典研究中，条件反射是用铃声产生的。应答是分泌唾液；铃声一响就给狗吃东西。狗就把条件刺激（铃声）和无条件刺激（食物）逐渐结合起来了。进一步发展这项技术，使得施加的那些作用更加复杂，从而揭示出脑的活动的更复杂的关系。

研究产生条件反射的机制，对建立高级神经活动的理论具有巨大的重要性，这是因为在控制论中脑被当作一个学习系统，而条件反射则被当作一种简单的学习行动。这一观点的根据，不仅在于已观察到活机体具有学习能力，而且还在于，基因载体中的存储量（人约有 50,000 个基因）显然不能把关于脑的结构的信息传给后代，因为脑是由几十亿个神经元构成的。

活脑并不是唯一能学习的东西、人工系统，特别是在第九章和第十二章里所描写的自动机，也能够学会完成这样重要的生物学功能，如把复杂情况加以分类和适应等。在人工系统中，实现条件反射的模型是非常容易的。这种模型之一，图

16.9，除了含有通常的形式神经元外，还含有累加器．累加器具有这样的性质，当输入收到的脉冲数达到累加器的阈值后才向输出传输脉冲．这可以用第九章中描写的脉冲计数器来实现．

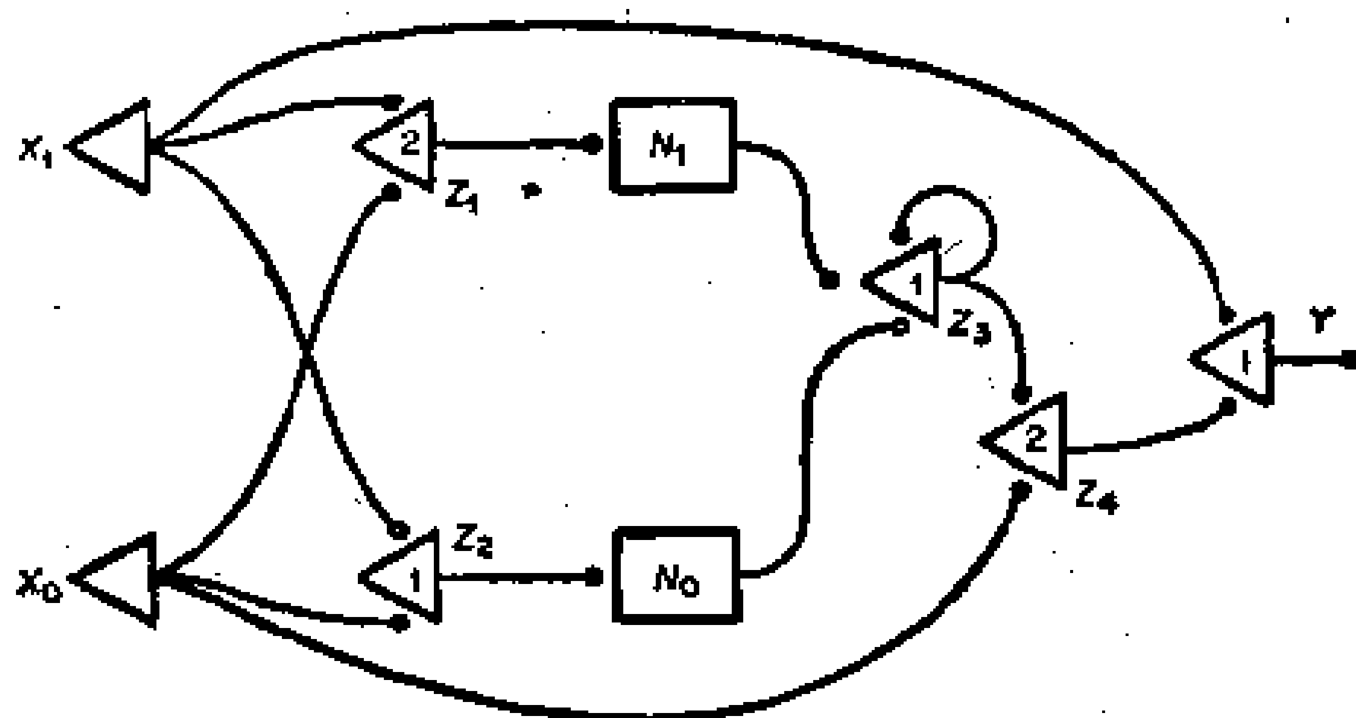


图 16.9．有存储装置的条件反射模型

累加器的阈值以随机方式改变；当计数器饱和时它就转回到零，重新开始存储脉冲．无条件激励是由接收器 X_1 知觉的，条件激励是由接收器 X_0 知觉的；输出效应器神经元 Y 则控制对无条件激励的反应．从图 16.9 可以看出，每当条件激励 X_0 为无条件激励 X_1 所强化时，中间神经元 Z_1 就把脉冲传输到累加器 N_1，在足够多次重合之后（次数取决于 N_1 的阈值），存储神经元 Z_3 就兴奋，接收器 X_0 的激励就产生反应 Y（经过神经元 Z_4）．

如果在条件激励 X_0 馈入信号时没有足够频繁的强化激励（来自 X_1），那么神经元 Z_2 将把足够多的脉冲传输到累加器（存储装置）N_0，从而使 N_0 的输出兴奋，这就会消除神经元 Z_3 的兴奋状态，于是就破坏了早先形成的条件反射．

这个条件反射模型可以发展成矩阵模式，它使得我们能在许多激励中的某些激励和反应之间，建立条件反射关系．

不能假设错综复杂的思想现象都可以化为条件反射。人类思想的更美妙的机制，无疑是建立在以种类繁多的方法加工信息的基础上的，其中的大多数至今仍未被发现和了解。

从对思想作严格唯物主义理解的观点看来，A. H. 柯尔莫戈洛夫的工作是很重要的。他令人信服地证明了，在原理上可能造出这样的人工系统，它们可以执行人类思想所表达的同样的功能。此外，不应当把人类思想的特性看作是唯一的思想形式。并不排除这样的可能性，我们将（在地球上或宇宙中）找到其他的思想形式，它们也可以用信息加工装置来模拟。

要在客观的生理条件下研究高级神经活动，同时把思想现象看作信息加工的话，所遵守的定律对于活的系统和人工系统都是通用的，这就揭开了掩盖在思想上的由偏见所造成的神秘的面纱。

巴甫洛夫的预言正在开始实现。"这一时刻将会到来——也许非常遥远——在自然科学的基础上发展起来的数学分析，将用巨大的公式和方程来把所有由脑所达到的（在身体和介质之间的）平衡包括在内，最终也将把脑本身包括在内"[1]。

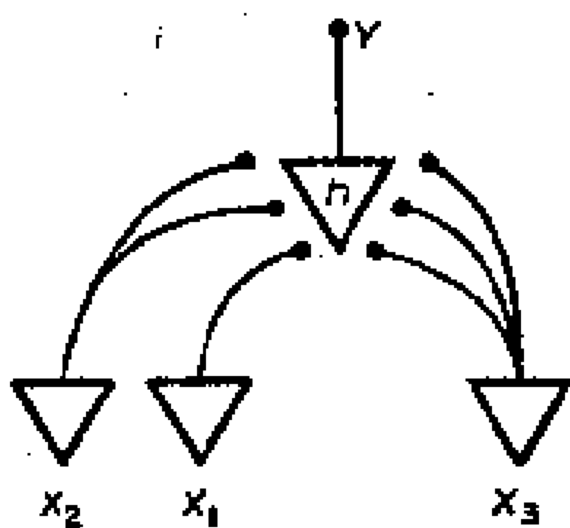


图 16.10. （第 1 题）

练习

1. 图 16.10 中的神经元有六个突触，这些突触都处在兴奋状态。如果阈值 $h=1$，那么这个神经元所实现的关于输入 X_1、X_2 和 X_3 的逻辑函数 $Y(t+1)$ 是什么？

1）"自然科学和脑"——在莫斯科召开的第 12 届博物学家和医师大会上的演说，1909 年 12 月 28 日。

解：$Y(t+1)=X_1(t)\vee X_2(t)\vee X_3(t)$.

2. (续)如果阈值 h 从 2 变到 6，函数 $Y(t+1)$ 将怎样改变?

解：(a) $h=2$：$Y(t+1)=X_2(t)\vee X_3(t)$;

(b) $h=3$：$Y(t+1)=X_1(t)\& X_2(t)\vee X_3(t)$;

(c) $h=4$：$Y(t+1)=X_1(t)\& X_3(t)$
$\vee X_2(t)\& X_3(t)$;

(d) $h=5$：$Y(t+1)=X_2(t)\& X_3(t)$;

(e) $h=6$：$Y(t+1)=X_1(t)\& X_2(t)\& X_3(t)$.

3. 如果在图 16.11 中所示的网络中，神经元 Z_1 和 Z_2 的阈值都等于 $h_1=h_2=1$，那么这个网络实现什么函数?

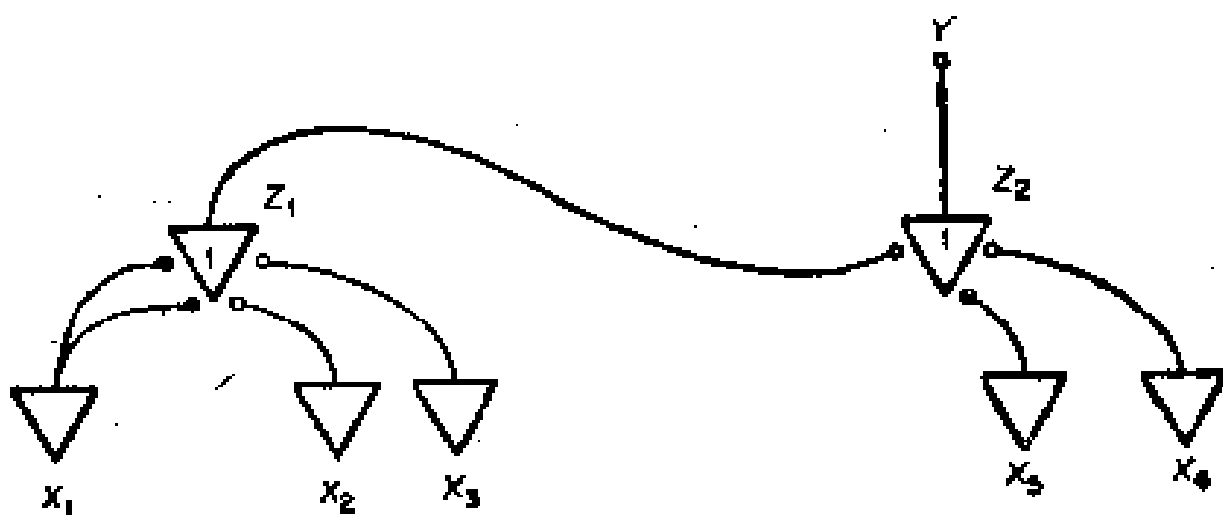


图 16.11. (第 3 题)

解：这个网络实现函数

$$Y(t+2)=[X_1(t)\&\bar{X}_2(t)\&\bar{X}_3(t)\&\bar{X}_4(t+1)]$$
$$\vee[X_5(t+1)\&\bar{X}_4(t+1)].$$

4. (续)如果这两个神经元的阈值增加到 $h=2$ 的话，函数 Y 取什么值?

解：$Y(t+2)=X_1(t)\&\bar{X}_2(t)\&\bar{X}_3(t)\& X_5(t+1)$
$\&\bar{X}_4(t+1)$.

5. 作出实现下列函数的神经网络：

(a) $Y(t+2)=[X_1(t)\& X_2(t)\&\bar{X}_3(t)]\vee X_4(t+1)$;

(b) $Y(t) = [X_1(t-3) \vee X_2(t-3)] \& X_3(t-1) \& \bar{X}_4(t-1)$.

解：这两个神经网络如图 16.12(a) 和 (b) 所示。

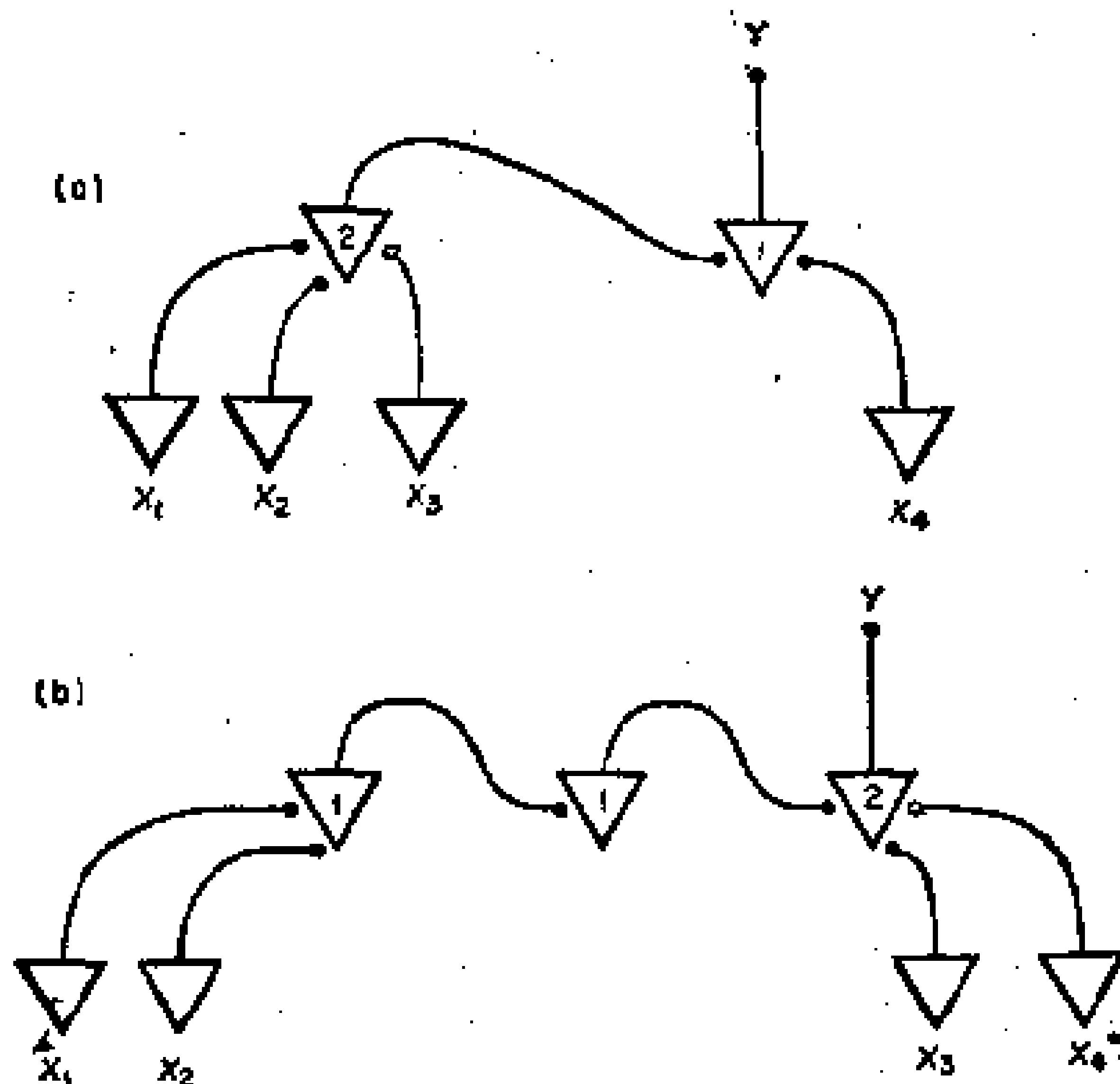


图 16.12. （第 5 题）

6. 图 16.13 是这样一个神经网络，它在输出处对来自输入 X 的 Y 对脉冲进行计数。如果连在神经元 Z 上的抑制突触断裂了，这个网络的功能将怎样改变？

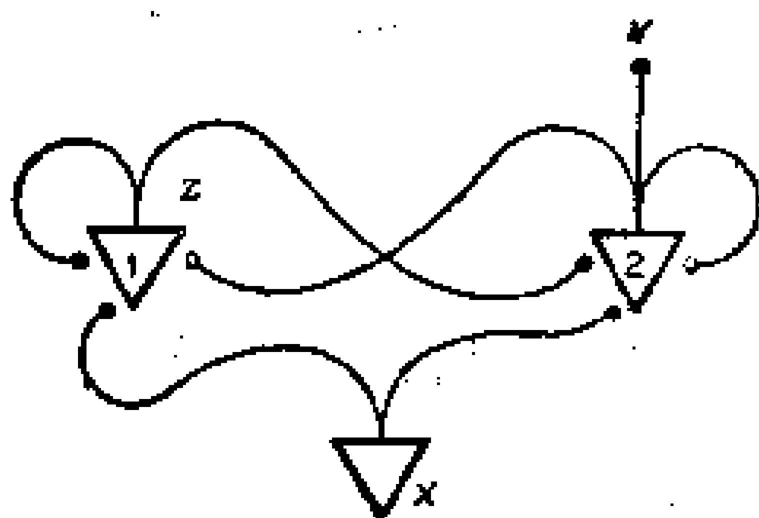


图 16.13. （第 6 题）

解：这时如果一系列脉冲到达输入 X，那么除了第一个脉冲外，所有的脉冲都将延迟一个时间单位才到达输出 Y。

第十七章 有组织系统

在研究同控制复杂系统有关的问题时，必须注意到各系统中的秩序化和组织化在程度上的区别．任何有组织系统的一个根本性质是，它在或大或小程度上是有秩序的．不能想象还有什么系统比在热动力平衡中运动着的分子更混乱了．所以，取这样一个混乱系统的状态作为秩序化的起点是有益的，这个系统的熵H为最大，并等于H_m．

我们将取系统状态偏离热动力平衡状态的程度，作为系统的有序度R的尺码，为此使用香农引进的“剩余度”概念：

$$R = 1 - \frac{H}{H_m}. \tag{17.1}$$

这样一来，任何系统的秩序化程度都将由R的大小来赋值，R在0和1之间变化，对完全无秩序的系统它取0值，而对理想的有序系统取值1．在理想的有序系统中，它的所有元件的状态都是明确地确定的，因此系统的熵等于0．但是一个不等于0的秩序，还不足以把系统归类为有组织系统．例如行星系统具有高度的秩序，但是并不能看作是有组织系统．如果在这个系统中出现象热传递这样的不可逆过程，并有外部的随机扰动作用于其上，那么它的熵将会上升，因而它的有序度将会下降，且最终可能降到零．为了补偿秩序的这种自然的降低，为了维持系统的秩序，就必须以某种方式从环境中接收负熵，例如以信息的形式，这些信息可以用来重建秩序．

因此，有组织系统的第二个重要特征是，它能吸收负熵并用来维持它的有序度，甚至增加它的有序度．在后一情况下，

这一系统不仅是有组织的，而且还是自组织的。

最后，有组织系统的第三个特征是，在这种系统中有着功能上不同的相互连接着的部分，这些部分使我们能把系统的某些元件的结构和用途，同其另一些元件的结构和用途区别开来，并使我们能确定在各个元件和系统的环境介质间的相互作用的性质。

在这一章中，我们将考察有组织系统中的一些控制问题：人工有组织系统——组织机构，以及活的有组织系统——有机体。

17.1. 麦克斯韦妖精

在一物理系统的能量方面，增加有序度因而增加组织化程度，这个问题为克拉克·麦克斯韦（Clerk Maxwell）于1871年在他的《热的理论》一书中，用一个与热力学第二定律[1]不相容的悖论的形式，非常清楚地提出来了。

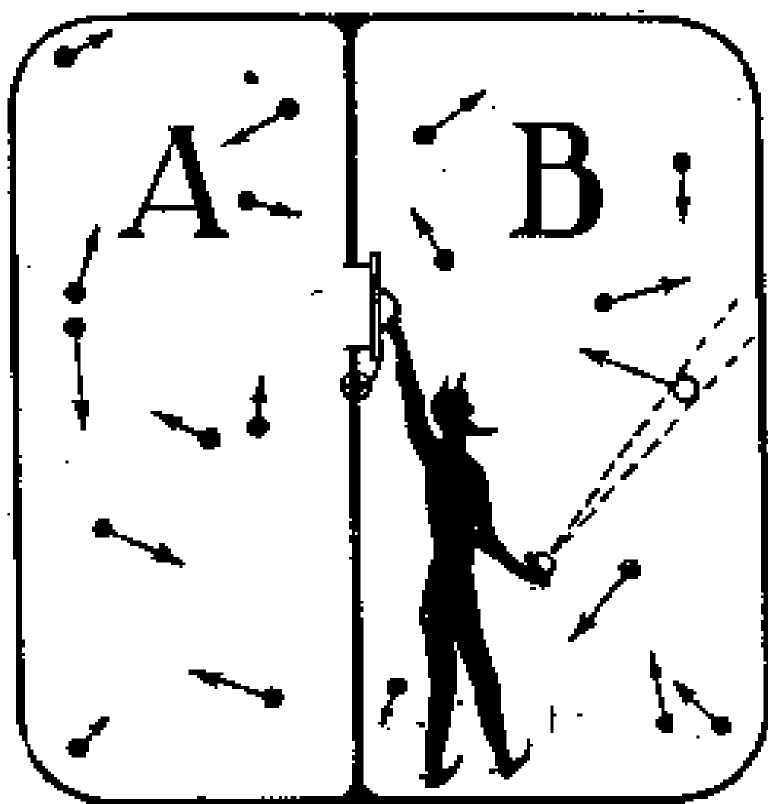


图 17.1. 麦克斯韦妖精

麦克斯韦说，想象有某生物，一个“妖精”，它是这样神通广大，以致能跟踪充满容器的每个气体分子的运动。把这个容器用一道隔板分为 A，B 两部分，并在隔板上安装一个阀门，当阀门打开时单个气体分子可以从容器的一部分经过阀门进入另一部分去（图 17.1）。

1）按热力学第二定律，在一个孤立系统中，任何变化只能导致它的熵的增加。

我们假设，这个容器起先完全充满了一定温度的气体，按照热的动力论，一定的温度对应于分子的一定的平均速度．因为气体分子的运动具有随机性质，有的分子的速度将大于平均值，有的则将小于平均值．那么，通过在适当时刻打开隔板上的阀门，妖精就能让快的分子从 A 进入 B，慢的分子从 B 进入 A，结果不须消耗能量，B 部分的温度就上升，A 部分的温度就下降．

只要考虑到，为了控制阀门，必须具有关于分子运动的信息，这一悖论就可以得到解释，要得到这种信息就要消耗一定的能量，它将比把分子分成"快"分子和"慢"分子后所得到的能量还大．如果我们把容器、气体、隔板和妖精组成的系统看作是处在热动力平衡状态中，即不存在能量转换过程或从系统的一部分到另一部分的能量传递过程，那么原理上跟踪分子运动是不可能的，因为这种系统不含有可作为轨道和速度的信息源的信号．为了使"妖精"能估计分子的运动，它至少应能看到分子，为此就必须提供亮光．但是，光源是一个不处于平衡状态的系统，不消耗能量它是不能工作的．

已经发现，为得到所要信息所需的能量，将超过因利用这一信息而吸收的能量，所以并没有违反热力学第二定律．

从所举的例子可以看出，即使象把"快"的气体分子同"慢"的气体分子分离开来的这种原始的有序系统，没有信息也是不可能的，而为了得到信息就必须把负熵引入系统．显然，这一点对于更复杂的系统也是成立的，在这种系统中要增长组织化的程度就需要从环境介质流进负熵．

另一个有趣的性质是，在反驳麦克斯韦妖精的可能性时，我们必须在信息和能量之间建立一个直接的物理关系．已经证明，有可能计算出为得到每一单位信息所必需的最小负熵量．如果熵 S 以尔格/度来测量，而信息以比特来测量，那么

由于系统状态的信息增量 ΔI 所引起的系统的熵的增量 ΔS 约为

$$\Delta S \approx -10^{-16}\Delta I \text{ 尔格/度.} \quad (17.2)$$

从关系式(17.2)可以看出，如果系统中的所有元件具有1尔格/度量级的熵变化，那么为了对系统的能量平衡施加可观的影响，信息量就必须达到巨大的比例，10^{16} 比特的数量级。在人工系统中，我们是以小得多的信息流操作的。例如由1000个元件组成的复杂系统，每个元件可以与多达10个其他元件相连接，在系统的这个线路中所包含的信息量总共是 1.33×10^5 比特，它小于一单位的熵的十亿分之一。但是这种看上去微不足道的微小影响却是非常重要的，在一定条件下可以证明是相当可观的，而且就象在相对论中所建立的速度对物体质量的影响那样，也被证明是很重要的。特别是，对于具有复杂结构的活机体来说，可以证明，在传输信息期间的负熵流量与系统的熵的变化是不相上下的。

17.2. 有组织系统中的控制结构

任何有组织系统：制造厂、医药中心、电话网或保险公司，都必须不仅保存它们的有组织状态，还要完成适当的功能。所以在有组织系统中要解决两类控制问题：控制系统的内部组织和控制系统的功能。为了解决这两个问题，系统就必须有适当机构可用，以便控制系统的功能，并把系统维持在可以工作的状态。图17.2给出了一家制造厂的典型控制线路，同时给出了完成上述类型功能的各个部门。B组包含与控制生产有关的业务，A组包含保证系统内部秩序的部门，而经理C则协调A组和B组的工作，也使系统的活动与环境介质中的过程相协调。这张流程图用双线指示物质流，用单线指示信息流(信息和命令信号)。

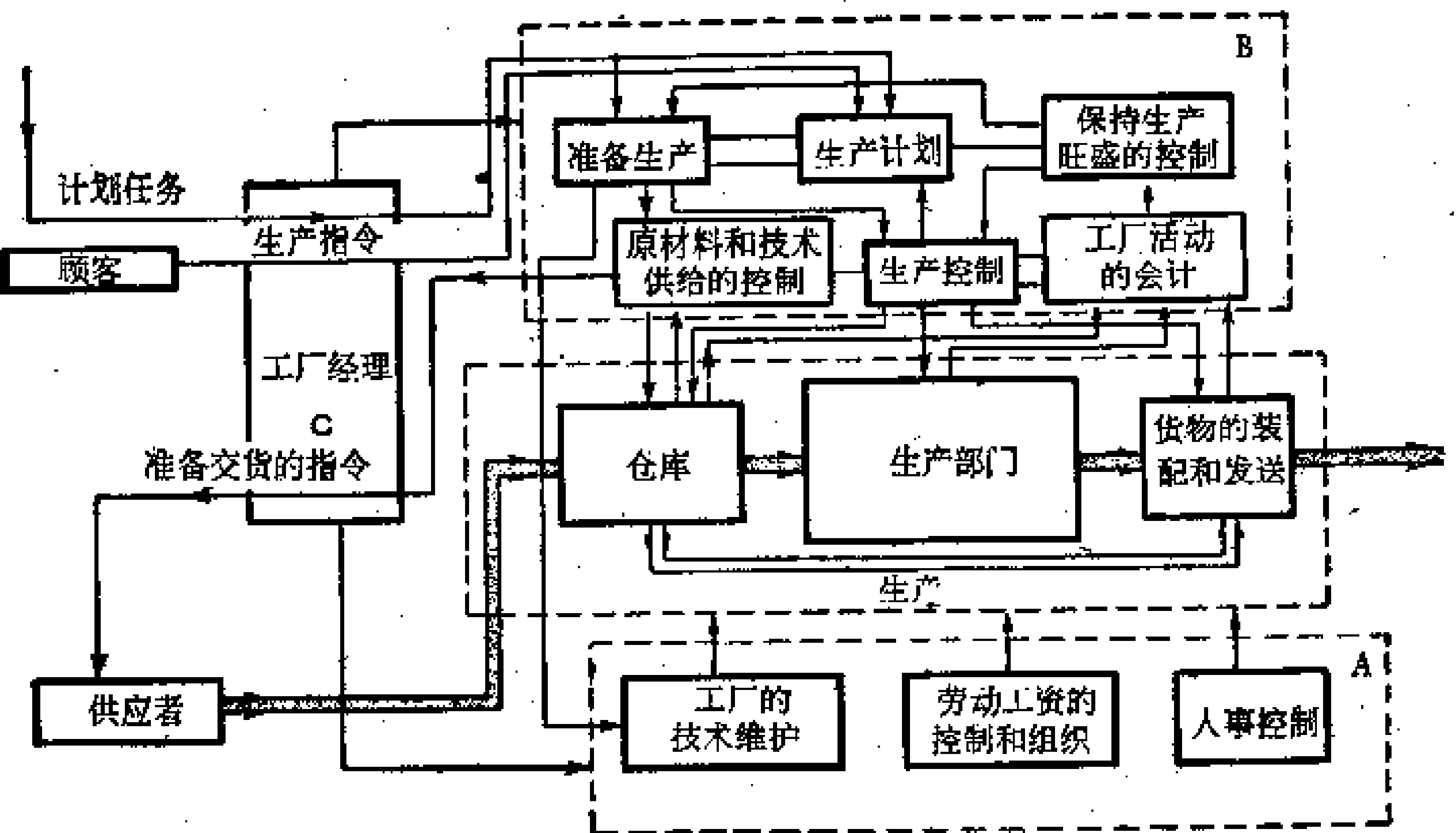


图 17.2. 控制一家工厂生产的典型线路

如果一家工厂的所有部门的控制职能几乎都是由人完成的，而自动机只起辅助作用，它只做调节工艺过程、记帐等简单工作，这时，控制一家工厂的上述结构是适用的．自然地就产生了这样的问题，是否就不可能造出直接由控制论机器控制工厂的系统．如果造得出，这将保证人能最小限度地参与控制过程．已经发现，这个问题在原理上是能够解决的．虽然现在还没有到用机器系统来控制复杂工厂的时候，但是随着时间的前进，这在技术上将成为可行的，在经济上将成为合算的．但即使只是在理论上解决这个问题，这也非常重要．可以设想，从热力学观点来分析这种系统也许是适当的．

事实上许多生产过程，如果还不是全部的话，都是“抗熵的”．即在转变为成品期间，都使最初原材料的熵降低．这一点在以下过程中特别明显：提取有用的矿物，分离和提纯物质，用毛坯制造一定形状的构件，装配工作以及控制产品的质量．把任何工厂维持在工作条件下的措施（修理和替换用坏了的设备、重建生产场所和通信线路、组织后勤、运输原材料和成品），性质上也是“抗熵的”．

要发展一个机器系统来控制复杂的有组织系统，象一家制造厂，一个在变化条件下工作的系统，包含下列主要困难：

(1) 这个复杂系统的状态取决于很多因素，控制作用很多，要在不长的时间内，从一切组合中选出最好的作用是不可能的．

(2) 在系统的各部分之间以及系统与介质之间，相互作用是沿着那样多的通道进行的，以致在控制系统中不可能对所有这一切都加以考虑．

(3) 系统和环境的性质与特征随时间变化的规律并非都是知道的，但尽管如此，为了完成控制作用，对这种规律应当多少知道一些．

（4）控制系统越复杂，计算最优控制所需要的时间就越长．此外，越是要求预测长时间间隔上系统的行为，结果就要求得越精确．如果不能迅速得到并提供解答的话，那么作为长期计算的结果所得到的这种解答，也就失去价值了．

实现一个机器控制系统时，上述困难是完全可以克服的，只要我们不试图建立这样一个理想系统，要求它能在任何情况下立即找到并实现一个严格最优的控制．其实我们并不要求一个系统是最优的，而只是要求它令人满意，要求它实行的控制至少不要比人差就行了．人在接收和加工信息方面的潜力是有限的，即使最有才能的领导人，也是根据比较少的因素和很粗糙的预测作出决策的，而且还要花比较长的时间．这意味着他不能得到严格最优的控制．但是，由人控制的工厂和其他复杂的有组织系统存在着，它们中有许多还搞得很成功．这意味着，如果机器控制系统执行控制职能时，即使不理想，但至少也不比人做的差，那么这就表明这种系统是有生命力的．

控制工厂的机器系统的一种可能结构，表示在图 17.3 上，这一系统是由一些对象的学习的、同态的（简化的）模型和各级中间媒介组成的．

最简单和变化最迅速的第一级模型，其任务是加工比较小的信息流，并迅速提供适合于在短时间内工作的控制信号．第二级模型考虑到更多的数据，并计算较长时间上的控制作用．后面各级模型工作得更慢，但是为更长时间产生控制作用．工厂和介质的各级模型都相互作用着，并产生用来维持工厂的正常秩序的 A 组控制信号，以及完成工厂对介质的功能的 B 组控制信号．

为了使模型能按照工厂与介质的性质和特征的改变而改变，模型就必须作成适应的，为此可以使用在第十一章中讲述

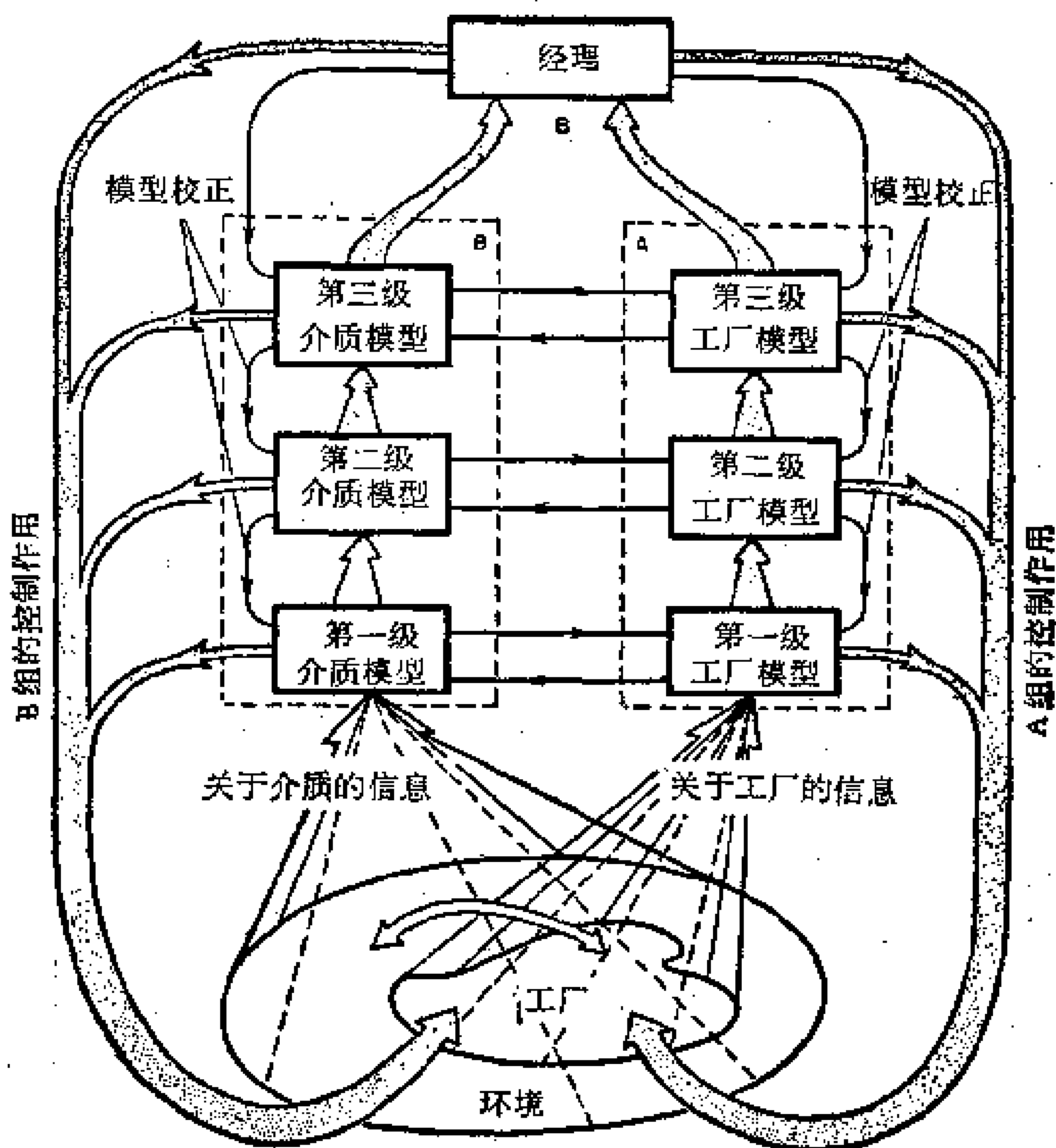


图 17.3. 控制工厂的机器系统的一个可能结构的例子

过的原理。机器系统的一个"初始"样机，它能显示出相当多种可能解答，可以通过一随机信号发生器引进适当数目的随机变化而做出来。

同一原理不仅可以用于控制工厂的生产过程，还可以用于控制其他复杂的、必须在变化条件下以稳定方式工作的人造有组织系统。

这种系统可以在一定时期里自治地工作，在控制等级中

的级数越多，这段时间就可以越长。但是，这个系统的工作应当不断地由人们进行校正，这些人负有确保系统以有益于社会的方式进行工作的责任。

17.3. 活机体

所有活机体，而且即使是它们的各个细胞，都是有组织系统。这些系统具有异于零的有序度。它们由功能上不同的部分组成，从环境摄取食物以及关于能量储备和秩序的信息，并在一段长时间内确保秩序的守恒和机体的生命活动，而这段时间要比活机体的自然分解时间长许多倍。

有一些更复杂的过程，如细胞的新陈代谢，活机体从胚胎的发育，对环境的适应性，学习、思考和再生的能力，如果不假设存在着非常美妙的控制机构在调节和指挥着所有这些过程的话，它们是不可想象的。

我们还不知道这些控制机构的结构的细节，也不知道在活机体中形成这些机构的方法，以及它们是如何传给后代的。

遗传学家的研究使我们确信，信息是借助于密码传给后代的，这种密码"写"在胚胎细胞核中所包含的核酸结构里。这个信息确定着机体的建造和发展的一整套计划、机体的类型和各别的形态、以及机体在变化条件下的生存能力。但是遗传信息只含有为形成结构和保证机体生命所必需的数据，这些数据在该物种的进化过程中是能够积累起来的。机体在介质中的行为的程序是不能以现成的形式包含在细胞里的，这是因为不可能预见所有可能出现的情况。但是，遗传信息的密码，显然包含着关于这种机构的构造的程序，这种机构能够依据给定情况产生反应，正象机构能够学习有目的的行为一样。

这些控制机构的一般结构可能是怎样的呢？它们表现为

集中的还是非集中的控制系统呢？对于作为整体的机体的生存能力极为重要的各个细胞、组织和器官的动作，它们又怎样保证其协调呢？甚至在科学深入研究活机体的控制过程之前，我们就已经能够尝试回答这些问题了.

对所有生命过程，包括细胞新陈代谢，进行集中控制的可能性是可以抛弃的，因为在任何器官中都不可能集中表明该系统状态所需的大量的信息，因为此系统是由无数象细胞这样的复杂对象组成的. 要想象一个器官能加工这样大量的信息甚至更要困难. 此外，要把关于每个细胞的信息传输到中央控制机构，就需要一种在任何机体中都不曾观察到过的信息网络. 因此在活机体中不大可能有集中控制.

作为第二种极端可能性，设机体是由很多系统结合起来的形式构成的，其中每一个细胞都单独地受到控制，即各个细胞完成的功能与其他细胞的状态无关. 假设这种极端的可能性也有困难. 这种假设之所以不大可能，是因为系统作为一个整体要协调其功能，工作量是十分可观的.

这些考虑以及所观察到的细胞、组织和器官的结构指出，机体的控制系统具有等级结构.

有充分理由假设，每一细胞都有它自己的控制机构来担负细胞内的新陈代谢. 细胞与其组织的其他细胞的相互作用是这样构造出来的，使得所有细胞的功能也服从整个细胞集合的利益.

可以假设，一个细胞的最有利的工作条件，是在它最优地履行它对于该组织的机能时出现的. 这个论断也适用于组织与特殊器官的关系，以及器官与作为整体的机体的关系.

各部分和整体的“利益”的和谐的结合，显然是决定活机体中的控制结构的基本原则.

当组织与器官长期不用时的萎缩，以及反过来，当加强使

用它们时的强烈增长和发育，都是支持这种假设的论据。

17.4. 自组织系统

所谓自组织系统是这样一个系统，它的有序度随时间的推移而增长。乍一看，有序度的增长好象与热力学第二定律是矛盾的，因此要么这种系统不可能存在，要么热力学第二定律不正确。其实并不是这样，存在自组织系统的可能性，并不违背热力学原理。自组织系统不但不能看作是孤立于环境的，而且实际上，能量和秩序不能无中生有，它们只能从适当的来源里提取。假设能量和秩序的来源是在系统内部，那么在原理上这个系统就不能具有自组织的性质，因为充其量（当系统中只出现可逆过程时）熵不会增加，但也不会减少的。据(17.1)式，系统在时刻 t_0 时的有序度 R_0 取决于表达式

$$R_0 = 1 - \frac{H_0}{H_m}, \tag{17.3}$$

这里 H_0 是系统在时刻 t_0 的熵。让我们假设系统在时刻 $t_1 = t_0 + \Delta t$ 时的熵等于 H_1，而它的有序度是

$$R_1 = 1 - \frac{H_1}{H_m}. \tag{17.4}$$

假设系统的最大熵 H_m 不变。那么当 $R_1 > R_0$ 时，这个系统将是有组织的。为了使这一情况发生，就必须满足条件 $H_1 < H_0$，因此

$$H_1 - H_0 = \Delta H_1 < 0, \tag{17.5}$$

又因为 $\Delta t > 0$，所以

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} < 0. \tag{17.6}$$

条件(17.6)意味着，在这样一个封闭系统中，熵随时间的推移而减少，这就违背热力学第二定律，因此是不可能的。

这表明，如果任何系统的有序度要增加，它就必须从外部得到能量和秩序（负熵）。显然介质的熵就要增加，而且介质的熵的增加，比自组织系统的熵的减少要多；随之包含自组织系统、能量及秩序源的某一系统的熵，总的来说是增加的，尽管事实上对这个系统的一部分——自组织的部分——熵将减少。

因此自组织系统只能作为物理系统存在的一般规律的特殊例外而存在，这种系统从环境"吸取"能量和秩序，其结果对环境造成"不可挽回的损失"。

通过考察下列情况，我们将得出同样的结论，这时系统的有序度的增加是通过增加最大熵 H_m 达到的，而熵 H 仍旧不变，这是由于，为此我们应当增加这个系统的元件数目（H_m 取决于它），这也需要从介质索取"食粮"。

这些结论完全符合于我们对唯一知道的那些自组织系统的观察：单个活机体和它们的群社、从环境吸取能量和秩序的必要性不应当使我们沮丧，因为宇宙中的资源实际上是无限的。再说，除了自然的自组织系统外，我们还能够、而且应致力于通过制造人工的自组织系统，以增加自组织系数的数目。即使目前我们还不知道怎样制造它们，我们能学会做到这一点，而且造出出色的自组织自动机来造福人类，这个日子肯定会到来的。

练习

1. 单原子理想气体的熵由下列公式表达（用自然单位）

$$S = N\ln\frac{V}{N} + CN,$$

这里 C 取决于气体原子的温度和质量，N 是原子数，V 是气体体积。

体积为V的容器用隔板分成两部分：V_1和V_2。在左边是有N_1个原子的气体1，在右边是有N_2个原子的气体2。这两种气体的原子质量和温度是相同的(即$C_1 = C_2$)。此外密度也相等，即

$$\frac{N_1}{V_1} = \frac{N_2}{V_2} = \frac{N}{V},$$

其中$N = N_1 + N_2$。

移去隔板，这两种气体就因扩散而混合了。试计算所包含的熵(所谓**混合熵**)增长了多少。再计算一下为了再把这两种气体分开所需要的信息量。所得到的结果说明什么？

解：在混合之前整个系统的熵等于

$$S_{始} = \left(N_1 \ln \frac{V_1}{N_1} + CN_1\right) + \left(N_2 \ln \frac{V_2}{N_2} + CN_2\right)$$

$$= N \ln \frac{V}{N} + CN.$$

因为$\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2} = \frac{V}{N}$和$N_1 + N_2 = N$。在混合以后，每种气体都占有整个体积$V$。这个熵将等于

$$S_{终} = \left(N_1 \ln \frac{V}{N_1} + CN_1\right) + \left(N_2 \ln \frac{V}{N_2} + CN_2\right)$$

$$= N \ln V + CN - N_1 \ln N_1 - N_2 \ln N_2.$$

熵的增加等于

$$\Delta S = S_{终} - S_{始} = N \ln N - N_1 \ln N_1 - N_2 \ln N_2$$

$$= -N\left(\frac{N_1}{N} \ln \frac{N_1}{N} + \frac{N_2}{N} \ln \frac{N_2}{N}\right).$$

为了把这两种气体再分开来，就需要确定每种气体原子的“种类”。从混合气体中随机地选出一个原子属于气体1的概率是$p_1 = \frac{N_1}{N}$，类似地，$p_2 = 1 - p_1 = \frac{N_2}{N}$。在确定一个气体原

子“种类”的试验中，所得到的信息等于 $-p_1\ln p_1 - p_2\ln p_2$. 因为混合气体共含N个原子，所以总的信息量等于

$$I = -N(p_1\ln p_1 + p_2\ln p_2) = \Delta S.$$

所以，为了把这两种气体再分开来所需要的信息量等于混合熵. 这是信息的负熵原理的一个特例，按这一原理，得到关于物理系统的信息等价于熵的减少.

2. 分离铀的同位素的设备，把含原子浓度等于 c_1 的成分铀-235（成分 X_1）和浓度等于 $c_2 = 1 - c_1$ 的铀 -238（成分 X_2）的原材料，分成两部分 y_1 和 y_2. 在第一部分中 U^{235} 的浓度等于 c_{11}，在第二部分中 U^{235} 的浓度等于 c_{12}. 第一部分的百分比(以原子数计)等于 p. 显然，$c_1 = pc_{11} + (1 - p)c_{12}$. 计算分离后熵减少了多少(有序度增加了多少)?

解：用第 1 题的结果，我们求出原材料的每一分子的混合熵减少了(以自然单位计算)

$$\Delta S = -[c_1\ln c_1 + (1 - c_1)\ln(1 - c_1)] + p[c_{11}\ln c_{11} + (1 - c_{11})\ln(1 - c_{11})] + (1 - p)[c_{12}\ln c_{12} + (1 - c_{12})\ln(1 - c_{12})].$$

所得到的这一结果只有理论-信息论的意义：因为可以看出，ΔS 等于该部分中关于成分的信息量 $I(y, x)$（我们把该部分和成分看作随机变量，它们可取两个不同值）.

3. 对于绿色植物来说，负熵源是什么？对于陆生动物呢？对于厌氧菌呢？

解：对于绿色植物来说，负熵源是由太阳辐射、土壤中的养料和大气中的二氧化碳组成的热动力不平衡系统. 对于动物来说，类似的系统是食物和空气中的氧. 对于厌氧菌来说，则是复杂的有机化合物，这些有机化合物被它们分解为较简单的化合物.

4. 对于象水文循环、喷泉、潮汐之类的“无生命的”但是稳

定的不平衡系统来说，负熵源是什么？

解：对于水文循环来说是太阳辐射；对于喷泉来说是地球的具有不同压力的内外层；对于潮汐来说是地球的旋转。

5. 在一个封闭的洞穴中，它的四壁和内部的所有物体都保持在温度 T 上，放有一架电视摄影机，它的温度是 T_1。借助于这架电视摄影机，如果：

(a) $T_1 = T$，(b) $T_1 < T$，(c) $T_1 > T$，

能够"看见"洞穴中的东西吗？这个例子所说明的一般原理是什么？

解：(a) 看不见。整个洞穴将充满温度为 T 的各向同性（各个方向相等）的平衡辐射。

(b) 看得见。因为温度 T 和 T_1 不等，洞穴里边的辐射将不是各向同性的。电视摄影机通过各向异性的辐射而交换能量。从具有较大辐射能力的物体发出的能量流，将会更大些，它们的象也就比较亮。

(c) 看得见，这时将得到情况 (b) 中所得到的象的负象。

一般结论：为了得到信息，在被观察的系统和观察系统之间必须存在不平衡。处于相互平衡状态的各系统，是不能交换信息的。

第十八章 人 和 机 器

人在地球上已存在了几百万年了，在这期间，人的活动主要是开发自然财富和自然力，来为其生物的和社会的利益服务。人学会了打猎、耕地和饲养家畜；人建立了工业和运输，使用着自然资源，换句话说，人利用一切方式来主动地影响自然界。但是如果这种影响没有任何目的的话，就无法设想怎么能用自然资源来为人谋利益。因为首先，没有一个单独系统能无限期地工作而不扰乱其功能（如果我们不考虑存在着这样的系统，它们的可靠性随时间的推移而增长），其次，介质条件是随时间的推移而变化的，人的目的和利益也是如此。所以不管机械化和自动化的成就有多大，不管人能使用的能源是多么新颖和充裕，也不管使用什么信息加工系统，人过去是、现在是、将来也总是人和自然界间复杂的相互作用链上决定的一环；人将永远是他所创造的且为他服务的任何系统的指挥者。

技术的进步，特别是通信、计算和自动化手段的发展，已经引起了能监视各种过程、并控制它们的机器的发展。所以人有可能不是自己直接参与，而是利用服从它的技术设备，间接地控制这些过程。自动装置的功能和参与控制的人的功能是如此紧密地交织在一起，以致我们如果仅限于问题的技术方面，而忽略人参与控制过程时所带来的心理学和生理学因素的话，许多控制问题就不可能表达出来，更不必说解决它了。

所以在控制论中，已经产生了科学的人-机器学科，它研

究两个基本问题：（1）人和机器间的共生；（2）人和自动机间的功能分配。

人和机器间的共生问题，研究作为系统的一环的人的性质，在这个系统中人和技术装置一起工作，而人和机器之间的功能分配问题，则需要解决人和机械因素的谐协组合问题。

18.1. 人和机器的共生

人和机器间最简单形式的相互作用，是人完成这样一个操作者的功能，他闭合控制系统中的起动线路以产生激发作用。操作者的功能就是象飞机驾驶员、舵手、汽车司机、雷达站操纵员、火车司机等人所进行的工作。

因为控制系统的性质取决于它的所有元件的性质，那么对于这种系统来说，在人-操作者的一切性质中，最重要的是作为控制链条中的一个传输环节的人的动力学性质。

一个系统的机器环节，通常是按一定规律传输信号的，而人这个环节则相反，他能够学会对所得到的信号作各种各样的反应。他可以充当静态或动态联结；他可以根据信号的变化率来校正自己的活动；他可以按信号的大小成比例地调节自己的动作，或完成某些非线性变换。规律的形成或加工信号（人类操作者所用的控制方法）是在学习过程中出现的。但是，即使在学习完成以后，人所用的控制方法仍然不是一成不变的，在数学上也只能在平均的意义上来描述。人能学习的变换的种类，受到他的生理学性质的限制，即受到他的动力学特性的变化范围的限制。

反映人类操作者的动力学性质的一个基本指标是潜伏期的值，所谓潜伏期，就是从给出一个激励的时刻到操作者产生一个反应的时刻间的时间间隔。对于各种样式的激励来说，即对于作用于人的各种感觉器官（分析器）的激励来说，潜伏

期是不同的。表 18.1 给出了潜伏期的值 λ 的范围。

表 18.1

激励的类型	λ 毫秒
接触	90—220
声音	120—180
光	150—220
气味	310—390
滋味	310—1080
运动(对前庭器官的效应)	400
痛	130—890

从这张表可以看出，操作者引进控制线路的时滞，要比电气元件或气动元件引进的大得多，因此这种时滞是对控制线路中总时滞估价时的决定因素。

大量研究表明，从操作者接收信号到输出作用的变换规律，在很大程度上取决于系统的其余部分的性质和特征，也取决于操作者的训练程度。

由人类操作者所实现的变换的这种"灵活性"，使他能非常有效地适应控制系统中的过程的特性和进度，显然，这里应要求此过程的特性与进度，是限制人的操作速度的生理限制所允许的。人类操作者在获得了必要的习性之后，所实现的控制方法接近于最优方法。在教人们控制由两个动态形态组成的系统的实验中，证明了上述结论。正如在第九章中所表明的，这种系统从任何初态到任何给定状态的最优转移过程包含两段时间，在第一段时间里控制作用保持在一个极值上，在第二段时间里则保持在另一极值上。

图 18.1 记录了这样一种系统的控制过程，其中把人作为一个控制设备。这里 x 表示被控系统的输出，u 表示控制作用(杠杆位置，人就借助杠杆对系统输入产生作用)。图 18.1(a)

所示的过程表示训练的第一阶段，这时刚开始训练操作者把系统从初态变到给定状态．图 18.1(b) 中所示的过程相当于这样的阶段，操作者已经获得了有效地控制这一系统的习性．对响应速度来说，非常接近于最优的那个过程，如图 18.1(c) 所示；这表示出操作者已训练了足够长的时间．有趣的是，最优控制方法是操作者在训练期间发现的，他并没有受到最优控制理论方面的专家的指教．

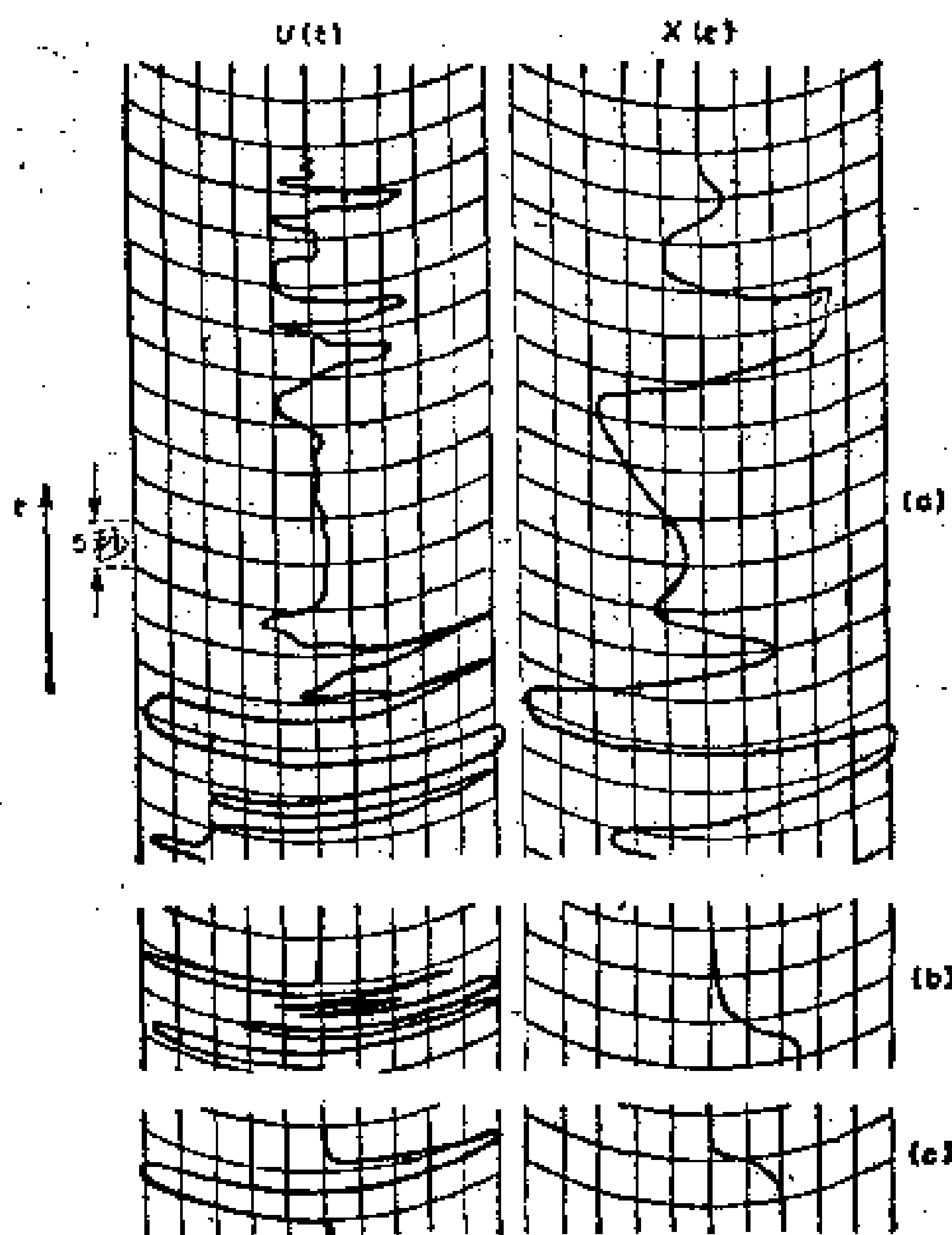


图 18.1． 人类操作者学习以最优方式控制一个系统

为了使人能控制任何过程，就必须在他的脑中，以感觉和知觉的形式把要控制的过程模拟出来，这时人的感觉和知觉携带着关于被控过程的信息．人进行控制的有效性决定于下列因素：(a) 关于被控过程的有用信息的量；(b) 为了加工所

得信息而动用的从过去经验得到的信息；(c)使用所得信息的方法，即人类对客观现象所作的反应的速度、精度和抗错能力，这些客观现象是作为感觉和知觉反映在他头脑中的．

脑对客观现象的知觉过程开始于现象的作用——对接收器分析器的激励，也就是对感觉器官神经末梢的激励．携带着关于被控过程的有用信息并要求人们作出应答的激励，叫做**激励信号**．

信号激励器的性质和个数，大大地影响着人类操作者的控制过程．为了执行原始形式的工作，人必须在一大批信号激励中进行选择．在"人和自动机"系统中，情况就不同了，那里也要对携带着关于被控状态信息的信号激励进行选择，但这种选择是事先由设备的设计者确定的，而且这些信号激励是由技术装置提交给操作者的．在这种系统中，系统的被控坐标的选择和信号的表现形式是非常重要的．

选择人和机器间交换信息的"语言"，换句话说，选择信息编码的方法，是最重要也是最复杂的问题．只有正确地解决了这个问题，才能成功地由人和机器共同来解决向他们提出的问题．在大多数场合，被控系统状态和在被控系统中发生的事件，是用光或声音信号、测量仪表的读数、以及在荧光屏上显示适当的几何图形等方式，来告诉操作者的．

为了计算在强度为 θ 的光或声激励作用下所出现的感觉量 f，可以使用下列型式的经验关系

$$f=K(\theta-\theta_0)^n, \tag{18.1}$$

这里 θ_0 是**绝对阈值**——激励的最小可感值，K 和 n 是常数，它们取决于光激励的背景、形状、尺寸、颜色以及声激励的等级．

在(18.1)式中指数 n 永远小于1，因为关于人的感觉器官的大量知觉实验表明，激励强度的知觉比总是小于激励强

度的物理比。例如对于视分析器来说，在适应黑暗后指数 $n=0.33$，在适应光亮后 $n=0.45$。

研究向人类操作者提供信息的方法，是一门新学科——工程心理学——的主题，这门学科基本上是依靠实验方法来研究的。工程心理学所积累的资料，对选择信号的样式和强度、仪表刻度的形状和尺寸、它们在控制板上的位置等，提出了重要建议。

在人-机器关系中，最复杂的但也是非常热门的问题之一是，人和计算机在它们"集体"解决某一问题时，彼此间交换信息所用的语言问题。显然，机器的内部语言，即在机器的各部分间交换信息和加工信息用的语言，应当这样选定，以便与装配成机器的各元件的性质和特征相符。但是，用这种语言在机器和人之间直接通讯是非常不便的。为此目的，以一种人与人之间通讯时所用的语言，即书写文字和谈话、数学符号语言和几何图形，进行通讯将好得多。使用这种语言，不仅便于把初始数据引进机器并从机器收回数据，而且——这是主要之点——也便于为计算机的操作编制程序。

近年来，已经进行了大量的工作来发展有关理论概念，在这种概念的基础上，与机器的通讯将更接近于对人方便的形式，同时也积极地进行了实现这种通讯形式的装置的研制工作。

18.2. 人和机器的分工

在统一的控制系统范围内，人和自动装置间功能的最优分配，是"人和机器"关系中的中心问题之一。在设计控制系统时，使所有可以自动化的控制功能，都实现自动化的目标是不适当的。但是抱相反的想法，即认为任何情况下都不应当把"纯属人类"的思维功能和决策交给机器来办，这也是不适

当的.

一个最优系统，包括人和机器，应当保证在操作时（不超出装置条件和人的生理条件的限制）最好地发挥这两种元件的潜力和优点，以达到最大的效能. 在发展的现阶段，比较完善的机器能够解决尚未恰当地加以形式化的问题，能够在不寻常的情况下作出决策，能够使用创新的控制方法.

另一方面，人作为控制系统的一部分，存在着许多不适宜处和局限性，如人对信号的反应速度是有限的，当需要干单调操作时可靠性不够，人的性能高度依赖于外部条件，也依赖于人内部心理状态和精神状态，此外人会疲劳. 人的控制功能的最大局限性是他接收和加工信息的速度提不高.

实验资料指出，人在识别符号时加工信息的速度可达到每秒 50 比特. 但是不能把这个数据当作计算一个操作者的允许负荷的基础，因为他的工作效率取决于许多因素：所用信号的字母表、加工信息所需的算法，等等. 实际上，如果人类操作者在复杂的工作条件下，加上还要接收信号，对控制器官产生作用，这时要实现令人满意的信息加工，信息流就必须不超过每秒 6 比特. 如果信息流加大，输人信息的损失就迅速上升. 操作者将不能再察觉信息了，因为信息已超出了他的最大通过容量，这将在对所收到的信号作反应时造成更多的错误和延迟.

自动装置在灵活性和潜力方面是较差的，但是在进行有限的一组操作时，它们在速度、可靠性、不疲劳和不受噪声干扰等方面是出色的. 用自动装置来解决控制问题的潜力正在不断扩大，并且侵入越来越新的领域，这些领域至今一直被认为是属于人类的特权的；因此，要勾画出自动装置发展的极限基本上是不可能的.

只有当我们有了一种判据，用它在每一具体情况下都能

选择最优功能分配方案，满足加在系统上的限制，同时判据还可以达到最优值，这时，人和自动机间的功能合理分配问题，才能认为是解决了．在对人和机器的功能进行分配时，必须考虑到一些重要性程度不同的因素，并且必须根据一种估计来作出选择，所以我们把判据 I 看作总判据，判据 I 中计入了系统的各个因素，按照它们的相对重要性，对系统功能作出具体的估值．我们可以用表达式

$$I = f(I_1, I_2, \cdots, I_n) \approx \sum_{i=1}^{n} \alpha_i I_i$$

作为这样一种总判据，这里 I_i 是各个指标的估值，α_i 是考虑到各指标重要性的加权系数．

在各具体估值 I_i 中应当包括，例如，控制的有效性、控制的可靠性、装置的成本、进行控制的日常费用、操作者的疲劳、操作者对这项工作的满意程度等．

但是，不要以为人和机器的最优功能分配总是能"一劳永逸"地找到并保持不变．首先，必须考虑到这种问题的解在很大程度上取决于实际条件，例如装置能工作多长时间(只动作一次还是多次)，系统的目的(用于生产还是军事)，和许多别的并未作为一部分列入正式估值的因素．此外，要求自动机完成的功能，显然必须从自动机"能"完成的那些功能中选出，而这些功能正在不断增多．最后，人和机器的分工在很大程度上取决于经济的和社会的因素，它们也在随时间的推移而变化；制造设备的成本、可靠性要求、劳动成本、人们的见解和爱好，即这种或那种工作对人们的吸引力，这些都是不断变化的．所以人和机器的分工，总是要受时时变化的各种因素的支配．

18.3. 生物电控制

前面已经讲过，在动物的神经系统中，指令的传输是通过

电脉冲实现的．例如，当一个人想握紧拳头时，电脉冲就开始流入实现这一运动的肌肉．人想握紧拳头的愿望越强烈，电脉冲的频率就越高．当人向一个目标扔石头或骑自行车时，这种复杂运动的完成，需要产生并执行一个复杂的信号程序，以便用这些信号控制数十个肌肉的动作．

已经发现，动物体为控制肌肉运动用的生物电信号，也可以用来控制人工装置．在设计操纵器或假肢时，就要用到动物神经系统和人造装置间的这种相互作用．

操纵器是复制人类操作者的运动的机械．当必须在可能危及生命的条件下工作时，例如在强烈的放射性辐射下、高温高压下或水下进行作业，或者需要产生超越人的可能的气力时，就要使用这种机械．用一个个电极来接收通到人类操作者肌肉的相应的生物电信号，操纵器的随动系统就能按操作者所希望的方式进行工作．

供假肢用的生物电系统是非常重要的．大约在十年以前，一组工程师、生理学家和医生制成了一只用生物电控制的假手．握紧拳头的动作是由装在假手内部的小型电动机完成的[图 18.2(a)]．电动机由两种指令来控制："握拳"和"松拳"．这两种指令，是按照从失去了手的那个人的前臂上被切断的肌肉处所取出生物电信号的强弱，在假手里产生的．取得生物电信号的部位是这样选择的（用加电极的方法），使得控制握拳和松拳的那组肌肉，正好是健康手完成这些功能所用的肌肉．一个装有这种假手的人，不断地使用在断手前就已获得的协调肌肉动作的习惯，就能很快学会控制假手．

图 18.2(b) 是假手的方框图．图中有两条通道来放大和变换生物电信号，以确保对拖动装置的可逆控制，既能产生握拳动作，又能产生松拳动作．

假手运动的特性和速度，可以由记录着一个循环的波形

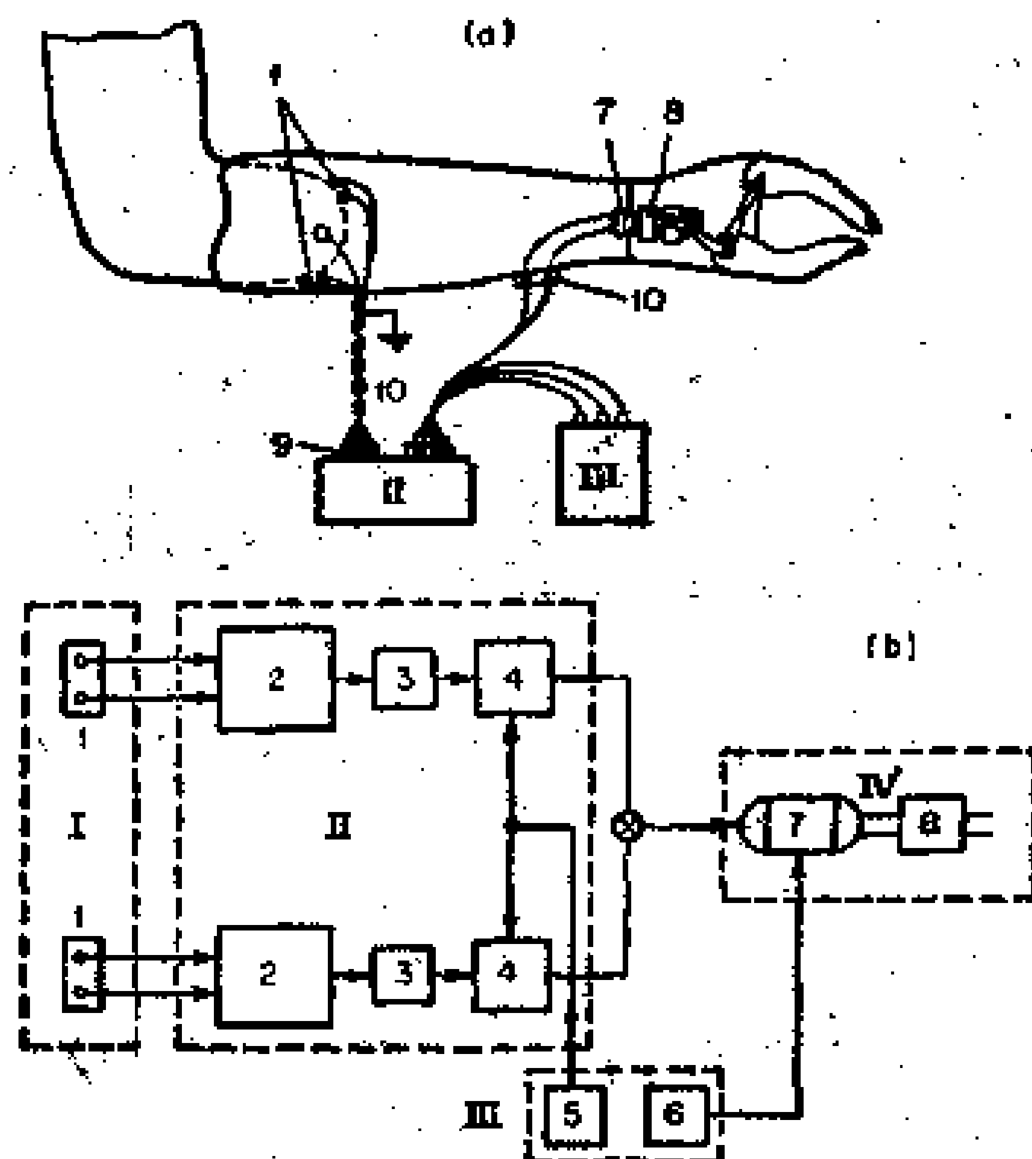


图 18.2. (a) 假手的半工业的(试验装置)线路. (b) 生物电控制的假手的方框图: I. 集流部件, II. 控制部件, III. 电源部件; IV. 拖动部件. 1. 电极, 2. 电压放大器, 3. 整流器, 4. 功率放大器, 5. 放大器电源, 6. 电动机电源, 7. 电动机, 8. 减速齿轮, 9. 和 10. 连接器

图来判断(图 18.3). 从图中可以清楚地看出表示生物电活动的脉冲的那些闪动, 这种闪动, 是在握拳时从收缩的那些肌肉, 以及松拳时从对抗肌, 即放松的肌肉中引出来的.

最近, 用生物电控制的假手已经完善到这样的程度, 完全证明假手可以保证完成所需要的握拳松拳动作, 而且可以按照佩戴者的意愿来调节这种机械产生的作用力.

生物电控制的假肢现在已经大规模生产了, 对于许多不幸事故的受害者来说, 这种假肢真正是无价之宝, 依靠这种假肢, 残废人几乎完全恢复了正常生活和工作.

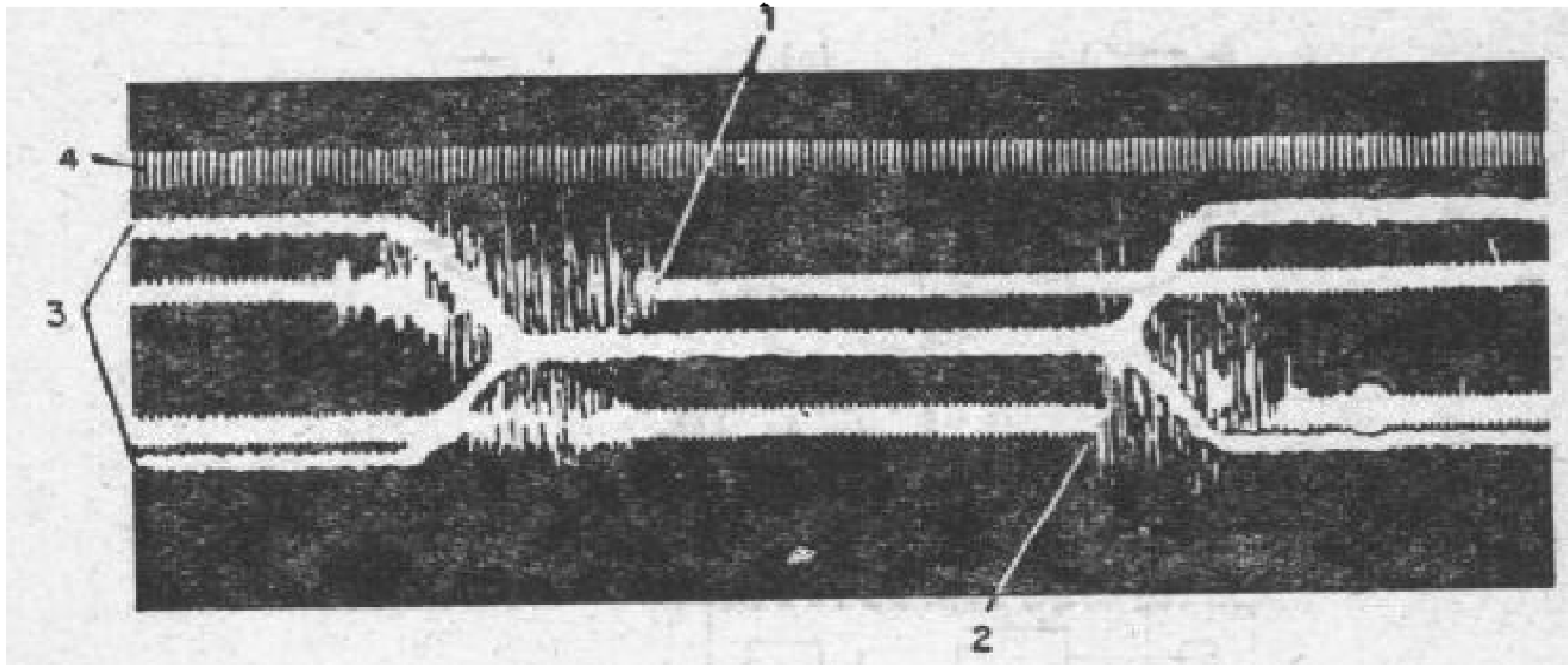


图 18.3. 用生物电操作的假手的运动循环：1. 使肌肉收缩的电信号，2. 使肌肉放松的电信号，3. 握拳，4. 时标（每小格 0.02 秒）

18.4. 人和机器

在进行复杂生产的工厂中、武装部队中和经济系统中，参加的人员都是很多的，要科学地叙述并解答如何控制这些系统的问题，就必然要阐明人和他的环境间的关系的规律，而环境首先是指自然界和社会．要解决这个问题，除了社会学方法外，可能的、富有成果的方法之一，虽然不是万能的，是带控制论观点的方法，这里把人看作是这样的系统，他的行为不仅取决于他的内部动机，而且在一定程度上还取决于环境所产生的控制作用．

这样的控制作用是鼓励、打击和教育． 象任何别的被控系统一样，人是受到一定限制的：一方面来自他的本身性质和周围的物质世界，另一方面来自社会． 属于第一种类型的限制有，例如，人的体力有限、需要呼吸、吃饭、喝水等，又如人对周围环境的知觉受到他的感觉器官性质的限制．

象任何别的动物一样，在这种自然限制的范围内，人（自觉或不自觉地）尝试选择这样的行为，以期使某个表征对生活满意程度的总感觉的判据最优化． 虽然这个判据随着时间的

推移会发生变化，而且对各人来说并不相同，但它毕竟是存在的，而基本上是与人达到目的的程度和满意的程度连在一起的。

18.5. 控制论的未来

这一章的主要目的是把人的发展和控制论的发展联系起来。现在很清楚，在发展进程中，我们正在经历一个人-机器局面，而这对于机器本身(自动机、控制系统等)和人类社会的未来，都是有决定意义的。对世界上的我们人类的社会来说，最重要的一个特点是理解科学和人类发展的这种局面的意义。如果不理解这一点，那么我们几乎只能最低限度地使用展现在我们周围的事物。这只会损害整个文明。

如果说控制论并不是我们未来社会和机体的进化所主要依赖的那个关键科学的话，那么控制论在许多方面仍是一门关键科学。虽然进化中还存在着不少危险和许多问题，在短期内我们只有一个办法来预知这些困难，那就是要充分了解控制论会给我们带来什么。

第十九章 远 景 展 望

控制论在它存在的很短的时间里，只有二十年，已经取得了巨大的进步。它已大大地影响了科学家和工程师、医生和管理人员、战略家和政治家的看法。从极端的观点看来，这种观点在一些人中产生热情，而在另一些人中产生怀疑，控制论成了本身具有世界观性质的一门重要的科学学科。它发展了自己特有的主题和研究方法，自己特有的定律和原理。虽然它是一门理论学科，但是它也成功地提供了一些实际结果，这些结果的重要性怎么估计也不会过高的。

这门科学的前景是什么？它怎样对我们的知识和生活作出贡献？在最近的和遥远的将来它的任务是什么？控制论机器作为人类的潜在竞争者对人类构成一种危险吗？和控制论的前景联系在一起的这些问题和许多别的问题，激动着世界上许多人们。显然没有人敢于在目前对所有这些问题作出肯定的回答，但是关于这门科学的发展可以提出一些见解。

贯串在整个人类历史过程中，技术的、文化的和社会的进步是由一些基本的过程组成的；虽然这些基本过程服从一定的法则，而这些法则又遵循社会发展规律，但是这些过程并没有被纳入确定的轨道，也没有受到有意识有目的的控制。现在形势已根本改变了。我们已经进入这样一个时代，社会能够而且必须确立工程、科学和艺术的发展目的，确定达到这些目的的最优途径，并有意识地指导为实现这些目的所作出的努力。

在生活的各种领域中出现的许多发展问题，都要求用控

制论的方法和手段来解决它们.

如果现在社会要保持其存在和进一步的发展的话，就必须解决复杂的控制问题. 为了改进制造工艺，就必须解决关于生产过程自动化的复杂问题. 由于运输系统的复杂性不断增长，就需要新的方法来控制货运和客运. 为了满足人们对消费物和服务的日益增长的需要，就必须引进贸易、家庭服务、医务和文娱机构等的运筹控制.

在控制经济、控制大型计划的发展和执行中，以及控制大型的科学研究计划中，所发生的问题甚至还要复杂. 有充分的理由相信，控制问题的规模将继续增长，其迫切性将继续越来越大. 显然，随着控制问题变得更加复杂，在解决问题时传统方法的作用将缩小，而控制论方法将占主导地位. 为了达到这些目标，应当发展一些新观念，这些新观念将使我们能在若干领域里改善控制质量，而工程师和科学家至今还未涉及这些领域，此外还应当发展新的手段来在实际中实现这些观念.

19.1. 未解决的问题

在控制论中，象在任何别的科学中一样，随着它的发展，受到实际需要和这门科学本身的内部需要的刺激，因而新的问题正在不断发生. 虽然下文所提出的控制论的几个实际任务，在最近的将来是一些最热门的问题，但通常很可能发现，最重要的将是从意料不到的方面得到的那些科学结果.

在生产控制的领域里，至今只在工艺过程自动化方面获得了实质性的成功. 但是，象设计元件、结构和系统，生产的准备和组织，向消费者供应货物的组织工作等重要的生产阶段，这些过程本身及其控制，基本上仍然局限于使用直观方法. 至于使用科学上已被确认的控制论方法来控制这些过程，还仅

仅是迈出了第一步. 即使是现在就已经清楚，象在计划的发展中找寻最优解之类的问题，由计算机来加以形式化并得到结果，要比人工更有效. 原理上说，形式化的可能性在组织问题的范围内也存在. 在各个生产阶段、在生产控制的各个等级范围内，从生产小组直到很大的生产单位(联合企业)，都会出现组织问题.

可以设想，将来设计某一工业控制系统时，所根据的信息来自这样一个合理的和高度自动化的系统，它收集并传输关于被控系统所有元件状态的信息，以及关于外部情况（市场情况）的信息，这个系统是由具有等级结构的控制中心组成的，而这些控制中心装备有一组互相连接的机器来加工信息，并向负责各具体小部门或作为整体的工作部门的管理人提出建议.

虽然这种类型的系统是可能的，也许是值得推荐的，但是显然在能够有效地和普遍地使用这种系统之前，对必须克服的技术困难却不能估计过低. 至今还没有方便的判据可用来选择关于系统和介质的状态的必需和适当的信息；非常复杂的组合体的操作最优化方法还没有得到充分发展；确立最优化判据的科学方法还处于发展的最初阶段；非常复杂的组合体的操作可靠性问题还没有得到适当的研究；为了在系统中各机器间以及机器与人间交换信息，应当使用何种易了解的语言的问题，还有许多工作要做.

要想通过复杂的组合体来实现一个自动最优控制系统，用现有方法实质上是做不到的，因为对于生产工厂类型的系统来说，必需的相互关系的数目是个天文学数字. 要把这些相互关系都列举出来，将超过《大英百科全书》的篇幅. 显然这种系统是设计不出的，要造出它来就更不可能了.

但是，不应当把这个问题看作是原理上不可解的，因为

这种复杂的(甚至更复杂的)控制机构，在自然界是存在的。人脑、即使是动物的脑，所完成的功能都要比控制任何工厂、运输系统或动力系统等所需要的功能复杂得多。但是，如在前几章中已表明了的，使活控制系统高度完善的自组织过程和学习过程，是可以而且正在人工系统中得到实现。所以，有理由希望，工作的进一步开展，对自组织机构的认识的深化，以及建造学习机器的进展，将为我们开辟道路，使得能从"胚胎状态"生长出的人造控制系统具有空前的能力，具有经适当学习和训练后能解决在控制巨大系统中所包含的博大精深的问题的能力。

重要和困难的问题发生在资源控制这一领域。任何经济系统都需要调度在其操作过程中所用到的资源：原材料、动力、燃料、设备、资金和人力。因为一个系统的有效性强烈地依赖于资源的分配情况，因此就产生了下列问题。对于系统和介质的每个给定状态，都必须找到和实现有限资源的这样一种分配，以期操作的有效性判据将取最优值。在解决这一问题时，所包含的困难涉及系统状态空间的高维性、大批局部极值的存在、以及对系统的资源量的限制随时间的推移而变化这一事实。

阐明活机体中的控制过程的机制这一工作的进一步进展，对于农业和医学是非常重要的。如果这些过程的秘密得到了阐明，我们就获得了新的可能性来控制动植物的发育、控制遗传、并确保迅速地繁殖多产的动植物物种。在下面种种问题中取得进展就更重要了：治疗遗传病、癌症和涉及活细胞中控制机构受到破坏的其他疾病，特别是与衰老作斗争以及解决与长寿有关的问题。

在医疗诊断中，控制论方法同样具有头等的重要性。在许多场合，进行诊断要考虑到许多因素，而在原则上一个人是

不能以所要求的精确度来做到这一点的。另一方面，教机器识别图形时所用的方法，可能对医生很有帮助，并把疾病的诊断放在强有力的数学基础之上。

对许多疾病的治疗，都可以看作是对病人身体里出现的过程进行控制，而治疗处置则看作是对某一复杂的动力学系统所施加的控制作用。在这一过程中，在动力学系统的控制理论中确定的许多重要事实，都可以用来拟订处置的战略和战术。显然，必须考虑到作为活体的这种系统，是极端复杂的，对它的知识是不充分的，而这种系统的性质又是很独特的，尽管如此，可以证明，被控动力学系统的运动的许多基本关系，对于展开这样一条通往医学理论和实践的新途径，是非常有用的。

社会学问题这一领域是控制论的极其重要的、但几乎没有得到什么发展的分支。对于构成人类社会的人们的行为的控制是由一些定律支配着的，把这些定律揭示出来，应当是这门力求成为一般控制理论的科学的目的之一。可能发生这样的事，包括教育、奖惩在内的控制作用的武库可以充实起来，而这些结果的利用也可以更加有效、更加宜人。精密的分析将揭示出法律和习惯加在人们行为上的那些不必要的限制，而解除这些限制将使人们的生活更自由幸福。

19.2. 新手段

即使是现有的信息加工手段，也不完全满足关于下列基本指标的实际要求：反应的快速性、存储量和可靠性。由于新问题是极为复杂的，所以如果我们在设计机器时不设法取得可观的进展的话，上述差距还会扩大。

在机器中执行操作的速度的增长，在原理上是有限制的，因为信号运动的速度不能超过光速。假设一个信号为执行一

项操作要走的最短路程长为1米，那么机器的最大反应速度可以是每秒 3×10^8 次操作。但是即使是这样高的速度，也不足以解决许多具有组合性质的问题，这种问题要求细查一大批可能的解。对机器本领的实质性增长所抱的希望，不应当寄托于加快机器操作速度，而应当寄托于把元件的序列操作的原则，换为平行操作的原则，这将保证同时执行一大批操作。

显然，在机器的存储器中，使用新原理来分配信息，使用新方法从存储器中提取所需信息，这样也能大大增加机器的本领。现有的机器中，记录和检索数据的方法是非常原始的，绝不能和活脑中记忆的性质相比拟。因此，改进存储装置的结构，将发掘出相当大的、至今尚未触及的潜力。

大量控制问题都涉及对动力学系统中的过程的研究。为了解决这种类型的问题，兼取模拟计算机和数字计算机的操作原理的“混合型”机器，可能证明是非常有效的。在这种机器中使用模拟模型，使我们能把得到一个解所必需的操作数减少到一小部分，而逻辑和程序控制则给这种机器以灵活性和通用性。

即使在目前，也可以使信息加工装置的可靠性高于构成这一装置的各个元件的可靠性。这是通过采用过量数目的元件，以及通过提供储备而实现的，使得尽管有个别元件损坏还能确保整个装置的正常功能。使用另一原理——装置的自恢复性质的原理，可以预料，将来在增加可靠性方面还会有重大进展。在这种装置中，损坏的通信将自动地重新建立起来，而出现的寄生连结将被破坏。要做到这一点，可以建造具有自恢复性质的元件，或者使用一个自动修理的部件，让它监视各个元件的操作，并对损坏的元件进行修理或替换。

上述考察指出，存在着许多至今尚未利用的潜力来改善

信息加工的能力，这些必将引起相当大的改进。但是，这一切都是用于以传统方法建造出来的具有传统结构的机器的。如果使用基于自再生、自完善和自组织原理的特殊方法，在建造信息加工装置的技术中，可能会出现根本的变化.按照这些原理造出一台机器，就必须用到一种“介质”，它是基本结构单位的来源，与活机体使用的方式类似，分配从周围介质汲取的食物，并把分子供给身体来建造它的器官.提取所需的“分子”并把这些分子组合起来的工作，可以这样来组织，或者借助于一个确定的过程——基于一个计划、一个程序、或一个仿形机器的“样本”，或者借助于一个随机过程——促进“有益的”合成物，抑制“有害的”合成物，这些合成物是随机出现的，并根据适当的判据来评价。对于这种建造机器的方法来说，“食物”或“介质”可以是许多实现一定逻辑功能的现成元件，也可以是一个单一类型的元件网络，在这个网络中只需要切断过量的联系；最后也可以是液体介质，在这种介质中，可以在物理场的作用下构成必需的结构。虽然在能够实现这种设计机器的方法之前，还有许多困难要克服，但是在原理上建造这种机器的可能性业已铸成，毫无疑问这是可以做到的。

一个非常有吸引力的远景是，根据混合型“机械-有机”系统来建造信息加工装置，在这种系统中，一个人工的(例如机械的)“骨架”，将确保结构的预定特性，而活的自组织的元件，将给予这个系统以必要的灵活性，来实现功能并使它本身适应变化着的条件。

19.3. 自动化的社会重要性

对于在前几章中略述的人类活动的各个分支来说，控制论不管多么重要，它至今对社会发展的最大的影响，无疑还是在生产的自动化方面。由于自动化在数量上的飞速发展和质

量上的不断改进，它引起了非常根本的社会变迁，这是历史上从未有过的，在某种程度上类似于第一次工业革命。第一次工业革命是与改用机器生产方法联系在一起的。但是，第二次工业革命，从其引起的后果来说，无可比拟地更加辉煌。与这个发展相联系的问题是如此复杂多变，以致我们不得不仅限于最简短地说明这些问题中较重要的一个，即解决创造性劳动和机械性劳动间的矛盾，并一般地澄清劳动分工的实质。

自从人由动物界进化过来的时候起，劳动就是人类社会的存在条件。人必须从事劳动，首先是为了满足他的物质需要。但是随着生产力的发展，生产关系起了变化，人本身也相应起了变化。在社会和个人的发展的一定阶段，劳动成了一个健康人的需要。但是，并非每种劳动都为一个健康发展的人所必需。重要的是这种劳动是创造性的还是机械性的。创造性劳动和机械性劳动，主要地就过程本身来说，其区别是鲜明的。创造性劳动的特点是不重复，在每一阶段上都是创新的。这种不重复性和独特性不是某种表面的、随便的或强加的东西——相反，它是创造性劳动的本质；只有这些性质才决定创造性劳动的结果，并构成这一结果的内容。它们是创造性的外部表现，即产生本质上新的、独创的有价值事物的一种活动。实际上如果没有作为一个整体的人格的不断发展，如果对劳动的全过程和最终目的没有一个清楚的认识的话，创造性劳动是不可设想的。创造性劳动可以是（但决不永远是）在科学、艺术、教学或社会活动方面的劳动。

与此相反，"机械性"劳动的特点是单调。机械性劳动的结果是由重复已知的一系列操作达到的。用得上的一些独创性因素，通常具有一种表面的、偶然的、在最好情况下是辅助的性质，它们并不决定劳动的结果，也不是达到这一结果的必要手段。由于它的呆板性而引起人的反感，人越发展，这种反

感就越大，消除机械性劳动是现代人类面临的任务。

显然，机械性劳动是人直接参与生产劳动、大量复制物质产品的必然结果，这种劳动要求单一类型的预先精确确定的操作序列。发明第一把石斧是一种创造性的行为，但是后来的所有斧头（我们不谈今后的改进）都是由机械性劳动制成的。

所以从人肩上卸下乏味和呆板工作的重担，从而取得作为一个人的自由，这就是控制论的奋斗目标。

19.4. 实际的和想象中的危险

一群独裁者，借助于能控制各个国家或我们整个行星的控制论机器，掌握权力，对这种可能性，控制论的奠基人诺伯特·维纳在展望控制论的发展远景时，表示了严重的不安。天主教多明我会的僧侣，杜巴莱尔（Dubarel），也谈到对控制的"机械化"后果的恐惧，他在维纳的《控制论和社会》一书首次问世时写道：

"今天我们已面临创建一个巨大的'世界国家'的危险，在这个国家中，用心的、自觉的、原始社会的不公正可能是群众得到统计意义上的幸福的唯一可能条件；创建这样一个世界，对于精神正常的人们来说是比地狱还要坏的"（《世界》，1948年12月28日）。

简单地掩盖这些意见是错误的。实际情况是足够严肃的，需要小心地分析，同时使我们抛弃表面上的和无根据的乐观主义。容易理解全世界的第一流科学家的忧虑，他们担心科学和工程的迅速发展的社会后果。巨大的自然力量——人所释放的"瓶中魔鬼"——在某些情况下可能转过来危害他，这种危险从来没有这样大过。

二十世纪的历史包含各种例子，有人类团结一致、人道、

为自由和社会正义而战，同时又有最无人性的独裁统治；有抗菌素和与衰老作斗争，又有毒气室和集中营；有理智的胜利，又有迫害有自由思想的人们的“魔鬼横行”；一方面在洞察宇宙和微观世界的奥秘，另一方面又有氢弹；一方面在为提高生活水平而斗争，另一方面又有军备竞赛和军事空间“计划”.

人类从改进控制论机器中会得到什么好处？对于这个问题，目前很难给出清楚的回答．归根结底，主要将取决于人类本身：取决于人类的社会成熟性、预见性、责任感、智力和意志．

关于人类是否会被智力上超过人的机器“种族”所代替或镇压的问题，是比较容易回答的．首先，人的潜力决不是固定不变的．特别是使用“智力放大器”作为人脑的扩充，将把人的思考力提高到数量上全新的水平．主要情况是，有那么一些人，他们幻想在人与“会思考”的机器之间，一场恶战是不可避免的，这种幻想的实质在于，他们把人类历史上阶级社会中的相互关系，带给比现代人发达得多的更加聪明的未来存在物了．而在阶级社会中，人类的相互关系是，为生存而战斗、竞争、统治和奴役——即使在目前这些概念也被所有思想先进的人们所反对．类似幻想的创作者，当他们指出了这些态度是陈旧的也是人类本性的特征的时候，恰恰只是揭露了他们自己的局限性．没有理由怀疑，地球上的未来居民——人与他的创造物，“会思考”的机器——会找到一种合理的、良好的相处方法，适合于这种有智慧存在物．不管怎样，即使这

类似这样的机器虽然本身无害，但可以为一个人或一些人用来增加他们统治其余人的权力，实际危险也可以是，政治领袖们可能企图不是用机器本身，而是用那种对人的潜力来说非常狭小、水平不高的政治手腕来统治他们的人民，并给人以这样的印象，这些手腕实际上是机器所产生的”。（诺伯特·维纳，《控制论与社会》）。

科学和技术的进步向人类，特别是向科学家本身，提出了严重的问题。但是我们不能为此而使科学向后转，因为它是人类固有的好奇心的产物。

如果过去有过具有大量先见之明的怀疑论者，他们会说石斧的发明已提供了一种非常危险的玩具，它最终将导致带有核弹头的导弹的发明。但是很清楚，使用人类天才的成果来作恶的可能性，并不意味着这些成果不应当产生；它只是证明，要使这些成就用来为善而不是作恶，必须进行斗争。历史表明，尽管火、黑色火药、电、原子能和许多别的“危险”发明是危险的，但是进步的社会力量已经设法控制了这些东西。

从上述这一切应当得到的正确结论是，在我们的时代，任何人——特别是知识分子——都不能放弃对社会发展作出科学分析的责任，也不能放弃积极地和有目的地影响这一过程的责任；他们不能把他们活动的社会后果的责任，以及决定现代社会发展的进程的责任，都推卸给别人。

得到下面这个结论是不正确的：社会不应当用计算机来发展和实现一项控制它本身发展的程序。长期的自由，是由认识和利用客观规律为其内容的，为此离开了机器是不可能的；因为应当迅速地、并以复杂的方式加工大量信息，以揭示主要发展趋势，并寻找最优解等等。用机器来控制将比不用机器更为完善；忽视或缺少技能在任何种类的工作中，从来没有带来什么好处。不过要了解到机器所提出的解可能隐藏着

意外的和致命的后果，这类似于雅各布（Jacob）的小说《猴子脚爪》中的魔咒，它以一种毁灭性的方式满足它的主人的愿望。所以没有什么东西能使人摆脱作出选择的责任，如果他不希望达到这样一种社会的话，这种社会的稳定性是靠"用心的、自觉的不公正"来维持的。

所有这一切都意味着，我们不能盲目地全盘接受那些基于人类关系和人本身的准则所采取的解决办法，而这种准则既不同于我们的理想，又不同于我们所想望的社会组织的概念，同时不管作出决定的是谁，不管它是电子脑还是官僚政治机器。人类社会进步的保证，存在于一切有思考力的进步人士的积极的、自由的、独立的努力之中。

未来取决于我们现在的努力，取决于我们对社会的客观发展的理解的深度、取决于我们的勇气、意志力和活动能力。我们希望看到，在未来，我们的自由的、善良的、高尚的子孙有一个真正幸福的社会。那时我们就是他们的可尊敬的祖先！

参考文献

第一章

1. Berg, A. I. Cybernetics—The Science of Optimal Control. *Energiya*, 1964.
2. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MIT Press and Wiley, 1948 and 1961（维纳，控制论(或关于在动物和机器中控制和通讯的科学)，科学出版社）。
3. Lyapunov, A. A. On some general problems of Cybernetics. Coll. *Problems of Cybernetics*, No. 1. Fizmatgiz, 1959（李亚普诺夫，关于控制论的一些普遍问题，戴香农，麦克卡赛编，自动机研究，科学出版社）。
4. Poletayev, I. A. The Signal. *Sov. radio*, 1958.
5. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.
6. Ashby, W. R. *An Introduction to Cybernetics*. Chapman and Hall, 1965（艾什比，控制论导论，科学出版社）。

第 二 章

1. Landau, L. D., Lifshits, E. M. *Mechanics*. Translated from Russian. Pergamon.
2. Peierls, R. E. *The Laws of Nature*, 1955.
3. Engels, F. *Dialectics of Nature* (恩格斯,自然辩证法; 人民出版社).
4. Yablonskiy, S. V. Fundamental notions of Cybernetics. Coll. *Problems of Cybernetics*. No. 2, Fizmatgiz, 1959.

第 三 章

1. Beer, S. *Cybernetics and Management*. English Universities Press, 1959.
2. Kogan, B. Ya. *Electronic Modelling Devices and their Application to the Study of Automatic Control Systems*. 2nd ed. Fizmatgiz, 1963.
3. Moore, E. F. Speculative experiments with sequential machines. Translated from English. Coll. *Automata*, IL, 1956 (莫尔,序列计算机的智力实验,载香农,麦克卡赛编自动机研究,科学出版社).
4. Mikheyev, M. A., Kolpakov, P. K. (eds.) *The Theory of Similarity and Modelling*. Izd-vo AN SSSR, 1951.

第 四 章

1. Andronov, A. A., Vitt, A. A., Khaykin, S. E. *The Theory of Oscillations*. 2nd ed. Fizmatgiz, 1959 (安德尔诺夫等,振动理论,科学出版社).
2. Landau, L. D., Lifshits, E. M. *Mechanics*. Transkated from Russian. Pergamon.
3. Nemytskiy, V. V., Stepanov, V. V. The qualitative theory of differential equations. Ch. 5 of *General Theory of Dynamic Systems*. Gostekhizdat, 1947.

第 五 章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Fano, R. M. *Transmission of Information: a Statistical Theory of Communication*. MIT Press, 1961.
3. Kharkevich, A. A. *Outline of the General Theory of Communication* Gostekhizdat, 1955 (哈尔凯维奇,通信论简述,人民邮电出版社).
4. Shannon, C. E., Weaver, W. *Mathematical Theory of Communication*. Univ. of Illinois Press, 1949.
5. Yaglom, A. M., Yaglom, I. M. *Probability and Information*.

Fizmatgiz, 1960 (A. M. 雅格洛姆, И. M. 雅格洛姆合著, 概率与信息, 上海科学技术出版社).

第 六 章

1. Lerner, A. Ya. *Introduction to the Theory of Automatic Control.* Mashgiz, 1958.
2. Fel'dbaum, A. A., Dudykin, A. D., Manovtsev, A. P., Mirolyubov. *Basic Theory of Communication and Control.* Fizmatgiz, 1963.

第 七 章

1. Lerner, A. Ya. *Introduction to the Theory of Automatic Control.* Mashgiz, 1958.
2. Pugachev, V. S. (ed.) *Fundamentals of Automatic Control.* Fizmatgiz, 1963.
3. Hammond, P. *The Theory of Feedback and its Applications.*

第 八 章

1. Bellman, R. *Dynamic Programming.* Princeton University Press, 1957.
2. Ventsel', E. S. *Elements of Dynamic Programming.* "Nauka". 1964.
3. Lerner, A. Ya. *Principles of the Construction of Fast-Response Servosystems and Regulators.* Energoizdat, 1961.
4. Pontryagin, L. S., Bolyanskiy, V. G., Gamkrelidze, R. V., Mishchenko, E. F. *The Mathematical Theory of Optimal Processes.* Fizmatgiz, 1961 (庞特里雅金等, 最佳过程的数学理论, 上海科学技术出版社).
5. Fel'dbaum, A. A. *Fundamentals of the Theory of Optimal Systems.* Fizmatgiz, 1963.

第 九 章

1. Shannon, C. E., McCarthy, J. (eds.) *Automata Studies.* Princeton University Press, 1956 (香农, 麦克卡赛, 自动机研究, 科学出版社).
2. Gaaze-Rapoport, M. G. *Automata and Living Organisms.* Fizmatgiz, 1961.
3. Kobrinskiy, N. E., Trakhtenbrot, B. A. *Introduction to the Theory of Finite Automata.* Fizmatgiz, 1962.
4. Murray, F. J. *Mechanisms and Automata.* Translated from English. *Kiberneticheskiy sbornik,* No. 1, IL, 1960.
5. Gavrilov, M. A. (ed.) *Structural Theory of Relay Devices.* Collection of articles. Izd. AN SSSR, 1963.

6. Trakhtenbrot, B. A. *Algorithms and Solution of Problems by Machine.* Gostekhizdat., 1957.

第十章

1. Kitov, A. I. Electronic Digital Computers. *Sov. radio,* 1956 (基多夫,电子数字计算机,科学出版社).
2. Kitov, A. I., Krinitskiy, N. A. *Electronic Digital Computers and Programming.* 2nd. ed. Fizmatgiz, 1961.
3. Murphy, G. J. *Electronic Digital Computers.* Van Nostrand, 1959.
4. Turing, A. M. Computing Machinery and Intelligence. *Mind*, 1950, 59, 433—460.

第十一章

1. Bellman, R. *Adaptive Control Processes: A Guided Tour.* Princeton University Press, 1961.
2. Tsien, H. S. *Engineering Cybernetics.* McGraw-Hill, 1954 (钱学森,工程控制论,科学出版社).
3. Ashby, W. R. *Design for a Brain.* 2nd ed. Chapman and Hall, 1960.

第十二章

1. Williams, J. D. *The Complete Strategist.* McGraw-Hill, 1954.
2. Ventsel', E. S. *Elements of the Theory of Games.* Fizmatgiz, 1959.
3. Luce, R. D., Raiffa, H. *Games and Decisions.* Wiley, 1957.
4. McKinsey, J. C. C. *Introduction to the Theory of Games.* McGraw-Hill, 1952.
5. Shannon, C. E. Game-Playing Machines. Transl. from English. *Kiberneticheskiy sbornik,* No. 1, IL, 1960.
6. Shannon, C. E. A Chess-Playing Machine. Transl. from English. Coll. *Papers on Cybernetics and Information Theory.* IL, 1963.

第十三章

1. Bush, R. R., Mosteller, F. *Stochastic Models for Learning.* Wiley, 1955.
2. Vannik, V. N., Lerner, A. Ya., Chervonenkis, A. Ya. Systems of learning pattern recognition by means of generalised portraits. *Tekhnicheskaya kibernetika,* 1965, No. 1.
3. Tseytlin, M. L. Teaching Stochastic Automata. *Avtamatika i telemekhanika,* 1961, No. 10.
4. Shannon, C. E. Presentation of a Maze-Solving Machine. *Trans. of the Eighth Cybernetics Conference,* Josiah Macy Found. 1952, pp. 173—180.

第十四章

1. Beer, S. Cybernetics and Management. English Universities Press, 1959.
2. Buslenko, N. P. Mathematical Models of Production Processes. *Nauka*, 1964.
3. Goode, H. H., Machol, R. E. *System Engineering*. McGraw-Hill, 1957.

第十五章

1. Zukhovitskiy, S. I., Radchik, A. I. Mathematical Methods of Network Planning. *Nauka*, 1965.
2. Burkov, V. N. et al. Network Models and Control Problems. *Sov. radio*, 1967.
3. Rivett, B. H. P. Ackoff, R. L. *A Manager's Guide to Operational Research*. Wiley, 1963.
4. Tsypkin, Ya. Z. Adaptation, Teaching and Self-Teaching in Automatic Systems *Automatika i telemekhanika*, 1966, No. 1.

第十六章

1. Bernshteyn, N. A. *Ways of Developing Physiology and Problems of Cybernetics Connected with Them*.
2. Praynès, S. N., Napalkov, A. V., Svechinskiy, V. B. *Scientific Reports* (on Neurocybernetics). Izd-vo Mosk. un-ta, 1959.
3. George, F. H. *The Brain as a Computer*. Pergamon Press, 1961.
4. Cybernetics and the Living Organism. Translated from the English. *Naukova dumka*, 1964.
5. Kleene, S. C. Representation of events in neural networks and finite automata. Coll. *Automata*. Translated from English. IL, 1956 (克林,神经网络和有限自动机中事件的表现,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
6. Kolmogorov, A. N. Life and thought from the viewpoint of Cybernetics. In the book: Oparin A. I. *Life and Its Relationships with Other Forms of Movement of Matter* AN SSSR, 1962.
7. Neumann, John von. *The Computer and the Brain*. Yale University Press, New Haven, 1958.
8. Rosenblatt, F. *Principles of Neurodynamics*. Spartan Books, Washington, 1962.
9. Ashby, W. R. *Design for a Brain*, 2nd ed. Chapman and Hall, 1960.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organizing Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organizing Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organizing Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*, 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence, 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cyberncties or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence, 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*, 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*, 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence, 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organizing Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernctics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*, 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944（薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社）.
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234（阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社）.
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring*（恩格斯,反杜林论）.
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M, et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence, 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernctics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944（薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社)。
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234（阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社)。
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring*（恩格斯,反杜林论)。
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton. 1956. 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organization*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organizing Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics. Thinking. Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944（薛定谔,生命是什么？上海人民出版社）.
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234（阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社）.
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring*（恩格斯,反杜林论）.
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organizing Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organizing Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cyberncties or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence, 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernctics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organizing Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organization*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organizing Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*, 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944（薛定谔,生命是什么？上海人民出版社）.
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234（阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社）.
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring*（恩格斯,反杜林论）.
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organizing Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organizing Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944（薛定谔，生命是什么？上海人民出版社）.
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234（阿希贝，智力放大器设计，载香农，麦克卡赛编，自动机研究，科学出版社）.
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring*（恩格斯，反杜林论）.
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organizing Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cyberenctics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*, 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M, et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944（薛定谔，生命是什么？上海人民出版社）.
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234（阿希贝，智力放大器设计，载香农，麦克卡赛编，自动机研究，科学出版社）.
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring*（恩格斯，反杜林论）.
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944（薛定谔,生命是什么？上海人民出版社）.
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234（阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社）.
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring*（恩格斯,反杜林论）.
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence, 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*. Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*. 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M. et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence. 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.

第十七章

1. Brillouin, L. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1967.
2. Foerster, H. von, Zopf, G. W. (eds.) *Principles of Self-organisation*. Pergamon Press, New York, 1962.
3. Fel'dbaum, A. A. (ed.) Self-learning Automata. *Nauka*, 1966.
4. Yovits, M. C. (ed.) *Self-organising Systems*. Proc. of an Interdisciplinary Conference, May 1959. Pergamon Press, New York, 1960.
5. Schroedinger, E. *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*, 1944 (薛定谔,生命是什么? 上海人民出版社).
6. Ashby, W. R. Design for an Intellgence-Amplifier. In *Automata Studies*, Princeton, 1956, 215—234 (阿希贝,智力放大器设计,载香农,麦克卡赛编,自动机研究,科学出版社).
7. Ashby, W. R. *Design for a Brain*, 2nd edition. Chapman and Hall, 1960.
8. Gel'fand, I. M, et al. Models of the Structural-Functional Organization of Some Biological Systems. *Nauka*, 1966.

第十八章

1. Engineering Psychology. Translated from English. *Progress*, 1964.
2. Lilly. *Automation and Social Progress*. Translated from English. IL, 1958.
3. Lomov, B. F. *Man and Engineering*. Izd-vo LGU, 1963.
4. Gaaze-Rapoport, M. G., Lerner, A. Ya, Oshanin, D. A. (eds.) The System 'Man—Automaton'. *Nauka*, 1965.

第十九章

1. Wiener, N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Wiley, 1961.
2. Wiener, N. *Cybernetics and Society*. Houghton Mifflin, Boston, 1954.
3. Wiener, N. New Chapters of Cybernetics. Translated from English. *Sov. radio*, 1963.
4. Berg, A. I. (ed.) Cybernetics, Thinking, Life. Collection of articles. *Mysl'*, 1964.
5. Thomson, G. *The Foreseeable Future*. 1955.
6. Il'yin, V. A. et al. (eds.) *The Philosophical Problems of Cybernetics*. Sotsekgiz, 1961.
7. Shklovskiy, I. S. The Universe, Life, Intelligence, 2nd edition. *Nauka*, 1965.
8. Engels, F. *Anti-Dühring* (恩格斯,反杜林论).
9. Encyclopaedia *Automation of Production and Industrial Electronics*. *Sovetskaya entsiklopediya*, 1962—1965.